



UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE  
Faculté de génie  
Département de génie civil

# DÉVELOPPEMENT DE BÉTON AUTOPLAÇANT (BAP) ET DE BÉTON SEMI-AUTOPLAÇANT (BSAP) À TENEUR EN PÂTE OPTIMALE

Mémoire de maîtrise en sciences appliquées  
Spécialité : génie civil

Zeinab Sayed AbdelHady Ali  
(Zeinab Sayed Ali)

Sherbrooke (Québec) Canada

Novembre 2020



# MEMBRES DU JURY

Ammar Yahia

---

Directeur

Habib Mesbah

---

Évaluateur

Richard Morin

---

Évaluateur

Patrice Rivard

---

Rapporteur



# RÉSUMÉ

Le BAP est un béton très fluide, homogène et stable. Le BAP facilite grandement la tâche des ouvriers lors de la mise en place du béton. Ce type de béton peut s'écouler et se consolider simplement par l'effet de la gravité. Le BAP se caractérise par un volume de pâte élevé. En raison de sa haute teneur en liant, la production de BAP nécessite normalement une plus grande quantité de ciment. La production de ciment est associée à une consommation d'énergie élevée et émissions de CO<sub>2</sub>, ce qui entraîne une pollution environnementale. Par ailleurs, la granulométrie des granulats, la teneur en poudre et l'utilisation d'adjuvants réducteurs d'eau ont un effet important sur la maniabilité de BAP.

Le développement de BAP pour obtenir un béton économique et efficace est une exigence industrielle importante. Le ciment étant le constituant le plus polluant et le plus coûteux du béton, la réduction du volume de pâte est une stratégie prometteuse pour produire un béton plus écologique. Une portion de ciment peut être remplacée par des ajouts cimentaires. De plus, il existe un plus grand potentiel de réduire la teneur en ciment nécessaire pour les mélanges de béton en optimisant les granulats combinés et la granulométrie des mélanges. Ce béton écologique doit satisfaire aux exigences des performances rhéologiques (état frais) et mécaniques (état durci).

L'optimisation du squelette granulaire peut non seulement réduire le volume de pâte, d'eau et d'adjuvants, mais également améliorer les propriétés d'écoulement du béton. La granulométrie, la forme, les textures, la rugosité et l'angularité sont des propriétés influentes

dans l'optimisation des granulats. De plus, pour un béton écologique, une compacité granulaire élevée est importante pour réduire la teneur en pâte, eau et ciment.

Ce projet de recherche vise à étudier l'effet des propriétés morphologiques des granulats dans les BAP. Les effets de la granulométrie des granulats, forme, angularité et texture de la surface et de la compacité granulaire seront évaluées. En outre, ce projet vise à élaborer une ligne directrice pour choisir le meilleur exposant ( $q$ ) pour la méthode de conception de la courbe idéale de granulométrie, afin d'obtenir la combinaison des granulats optimale, ce qui réduit considérablement la quantité de pâte de ciment requise. Les résultats de cette recherche peuvent être utilisés non seulement par les producteurs de béton, mais également par les producteurs des granulats pour créer des granulats améliorés à utiliser dans le BAP.

Les caractéristiques des squelettes granulaires de 38 mélanges de BAP à faible liant ont été étudiées pour minimiser la teneur en liant et le volume de pâte ( $V_P$ ). 20 mélanges granulaires ont été dosés en utilisant 5 modules de distribution Fuller-Thompson différents ( $q$ ) de 0,4 à 0,5 et 4 rapports volumétriques sable/agrégat total ( $S/G$ ) de 0,45 à 0,6. Les mélanges BAP-éco étudiés avec un rapport eau/liant de 0,60 et  $V_P$  de 29% ont été classés en fonction de leur fluidité, de leur capacité de passage et de leur stabilité statique. Le volume de pâte a été réduit en deux étapes successives à 26% et 24% à l'aide des mélanges BAP-éco dosés aux squelettes granulaires optimisés.

En utilisant l'analyse d'image 3D des formes des granulats, des versions modifiées du modèle Funk-Dinger et de nouveaux modèles de granulométrie en tant que fonctions du logarithme naturel des tailles de particules ont été proposées pour les squelettes granulaires optimisés. Les nouveaux modèles proposés ont été validés avec les mélanges BAP-éco contenant le  $V_P$  minimum de 24% et 2 nouvelles sources de granulats. Les résultats ont montré que la prise

en compte des dimensions réalistes du granulat en utilisant le nouveau modèle de granulométrie logarithmique proposé avec  $q$  de 2,6212 et  $S/G$  de 0,55 peut entraîner une réduction significative de la teneur en liant et du volume de pâte de  $309 \text{ kg/m}^3$  à  $256 \text{ kg/m}^3$  et 29% à 24%, respectivement, avec des performances d'ouvrabilité équivalentes. Celles-ci ont également conduit à réduire les valeurs du potentiel de réchauffement climatique de 206 à  $172 \text{ CO}_2\text{-equ kg/m}^3$  de béton, tandis que des indices d'éco-efficacité et des caractéristiques de maniabilité plus élevés, ainsi qu'une résistance à la compression appropriée pour les applications résidentielles ont été obtenus.

**Mots clés :** Béton autoplaçant écologique ; rugosité ; angularité ; Maniabilité ; Ajouts cimentaires.





# REMERCIEMENTS

Le remerciement infini avant tous est à notre Dieu le plus puissant qui nous a comblé des bienfaits de la science.

Ce travail a été réalisé dans le cadre de la « chaire industrielle de recherche sur le développement des bétons fluides à rhéologie adaptée (BFRA) et leur utilisation dans les infrastructures en béton », dirigée par professeur Ammar Yahia financée par l'Université de Sherbrooke, le CRSNG « Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada » et 8 partenaires industriels impliqués dans le programme de cette chaire. Sans l'aide de beaucoup de personnes, la rédaction d'une mémoire ne serait pas possible. Avant de commencer, je voudrais remercier ces personnes!

Mes remerciements les plus sincères vont à mon directeur de recherche professeur Ammar Yahia, pour sa grande patience, ses encouragements et son grand degré de professionnalisme. Ceux-ci m'ont beaucoup aidé à compléter ce projet qui me tenait tant à cœur. J'exprime davantage mes remerciements à Dr. Masoud Hosseinpour, pour sa disponibilité et ses conseils sans lesquels ce projet n'aurait pas pu se réaliser. Mes vifs remerciements vont aux membres de jury qui ont accepté d'évaluer ce modeste travail. Grand merci à tous les chercheurs et les membres techniques du groupe de béton, Département de Génie Civil à l'Université de Sherbrooke.

Je tiens enfin à remercier mes parents et mes frères (Mohamed et Khaled) pour leurs encouragements et leur soutien. Merci à mes trésors de vie (Toka et Safa) et merci à l'amour de ma vie Ahmed qui m'a donné l'énergie et la patience, surtout dans les moments difficiles, pour mener à bien ce travail.

*Zeinab Sayed Ali*

*Novembre 2020*



# TABLE DES MATIÈRES

<b>RÉSUMÉ .....</b>	<b>V</b>
<b>REMERCIEMENTS .....</b>	<b>IX</b>
<b>TABLE DES MATIÈRES.....</b>	<b>XI</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX.....</b>	<b>XV</b>
<b>LISTE DES FIGURES .....</b>	<b>XIX</b>
<b>CHAPITRE 1 INTRODUCTION .....</b>	<b>1</b>
1.1. APPROCHE DE RECHERCHE .....	5
<b>CHAPITRE 2 ÉTAT DE L'ART .....</b>	<b>7</b>
2.1. IMPACT ENVIRONNEMENTAL DU BÉTON .....	7
2.2. REMPLACEMENT DU CIMENT .....	8
2.2.1. <i>Matériaux remplaçant le ciment</i> .....	8
2.3. GRANULATS DANS LE BÉTON .....	10
2.3.1. <i>Description des propriétés des granulats</i> .....	10
2.3.1.1. Évaluation des propriétés morphologiques des granulats .....	10
2.3.2. <i>Granulométrie</i> .....	14
2.3.2.1. Évaluation des propriétés morphologiques des granulats .....	15
2.3.2.2. Méthode de Shilstone.....	15
2.4. . MODÈLES THÉORIQUES DE LA COMPACITÉ .....	16
2.4.1. <i>Courbes d'optimisation</i> .....	17
2.4.2. <i>Modèles de compacité des particules</i> .....	19
2.4.2.1. Modèle Furnas .....	21
2.4.2.2. Méthode Dewar .....	21
2.4.2.3. Modèle de compacité granulaire linéaire.....	22
2.4.2.4. Modèle de compacité compressible.....	23
2.4.2.5. Modèle de Fennis.....	25
2.5. . CONCEPTION DE BÉTON ÉCOLOGIQUE.....	25
2.5.1. <i>Béton d'Ecosmart Canada</i> .....	27
2.5.2. <i>Critères de conception de BAP-éco selon Mueller, 2012</i> .....	28

2.5.3. Méthode de conception du mélange développée par (S. Fennis 2010) pour BAP-éco .....	30
2.5.4. Béton vert (Danemark).....	32
2.5.5. Méthode de conception du BAP-éco développée par Esmailkhanian (Esmailkhanian 2016).....	34
2.5.6. Particules ultrafines dans le béton.....	35
<b>CHAPITRE 3 PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS DU PROJET DE RECHERCHE</b>	<b>37</b>
3.1. PROBLÉMATIQUE .....	37
3.2. OBJECTIFS DE L'ÉTUDE.....	38
<b>CHAPITRE 4 PROGRAMME EXPÉRIMENTAL</b>	<b>41</b>
4.1. PLAN EXPÉRIMENTAL .....	41
4.2. PHASE I : OPTIMISATION DU SQUELETTE GRANULAIRE.....	41
4.2.1. Phase I - Étape 1 : Caractérisation de la morphologie des granulats .....	42
4.2.2. Phase I - Étape 2 : Optimisation de la compacité granulaire.....	42
4.3. PHASE II : ÉVALUATION DE L'EFFET DES CARACTÉRISTIQUES DES GRANULATS SUR LA RHÉOLOGIE ET LES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DU BAP-ÉCO.....	42
4.4. PHASE III : OPTIMISATION DU VOLUME DE PÂTE DES MÉLANGES FORMULÉS DANS LA PHASE II...	43
4.5. MATÉRIAUX UTILISÉS.....	44
4.5.1. Ciment .....	44
4.5.2. Granulats.....	44
4.5.3. Adjuvants chimiques .....	45
4.6. MÉTHODES DE CARACTÉRISATION .....	46
4.6.1. Évaluation des caractéristiques morphologiques des granulats .....	46
4.6.2. Détermination de la compacité expérimentale des mélanges .....	47
4.6.3. Dosage des mélanges granulaires étudiés de la source .....	48
4.6.4. Préparation du béton .....	56
4.6.4.1. Proportion des mélanges granulaires de la source I étudiés .....	56
4.6.4.2. Paramètres de mélange, ouvrabilité et les résistances à la compression ..	57
4.6.5. Approche expérimentale pour déterminer la courbe de granulométrie idéale .	58
4.6.5.1. 1 <sup>ère</sup> étape: Volume de pâte ( $V_p$ ) de 29%.....	58
4.6.5.2. 2 <sup>e</sup> étape: $V_p$ de 26% .....	58
4.6.5.3. 3 <sup>e</sup> étape: $V_p$ de 24% .....	59
4.6.5.4. 4 <sup>e</sup> étape: proposer les nouveaux modèles de distribution granulométrique .....	59
4.6.5.5. 5 <sup>ème</sup> étape: Validation des modèles proposés avec de nouvelles sources des granulats.....	59

4.6.6. Séquence de malaxage .....	59
<b>CHAPITRE 5 NOUVEAUX MODÈLES DE DISTRIBUTION</b>	
<b>GRANULOMÉTRIQUE PROPOSÉS.....</b>	<b>63</b>
5.1. MODÈLES A1 ET B1: MODÈLE DE FULLER-THOMSON (FULLER ET THOMSON, 1907) .....	63
5.2. A2 ET B2: MODÈLES FUNK-DINGER (FUNK ET DINGER, 1994) AVEC $D_{\min}$ ET $D_{\max}$ MODIFIÉS .....	64
5.3. A3 ET B3: NOUVEAUX MODÈLES FUNK-DINGER (FUNK ET DINGER, 1994) AVEC $D_{\min}$ ET $D_{\max}$ MODIFIÉS .....	64
5.4. LES PREMIERS NOUVEAUX MODÈLES PROPOSÉS: A4 ET B4 .....	65
5.5. LES NOUVEAUX MODÈLES PROPOSÉS: A5 ET B5 .....	65
<b>CHAPITRE 6 ANALYSE ET DISCUSSIONS DES RÉSULTATS .....</b>	<b>67</b>
6.1. RELATION ENTRE PLUSIEURS CARACTÉRISTIQUES MORPHOLOGIQUES .....	67
6.2. COMPARAISON ENTRE LES MODÈLES DE DISTRIBUTION GRANULOMÉTRIQUE TRADITIONNELS ET LES NOUVEAUX MODÈLES PROPOSÉS .....	67
6.3. VALIDATION DES MODÈLES DE GRANULOMÉTRIE PROPOSÉS À L'AIDE DE TROIS SOURCES DE GRANULATS II, III ET IV .....	74
6.4. APPROCHE D'OPTIMISATION ET DOSAGE DES MÉLANGES .....	79
6.4.1. Caractéristiques d'ouvrabilité et les résistances à la compression ( $f'c-28d$ ) des BAP-éco proportionnés avec un volume $V_p$ de 29%.....	79
6.4.2. Caractéristiques de maniabilité et résistances à la compression ( $f'c-28d$ ) des BAP-éco ayant un volume de pâte $V_p$ de 26% .....	81
6.4.3. Ouvrabilité et résistance à la compression ( $f'c-28d$ ) des BAP-éco avec un volume de pâte $V_p$ de 24%.....	88
6.5. NOUVEAUX MODÈLES DE DISTRIBUTION GRANULOMÉTRIQUE.....	90
6.5.1. Modèles A1 et B1: modèle Fuller-Thompson (Fuller et Thomson, 1907) .....	91
6.5.2. Nouveaux modèles A2 et B2 avec $d_{\min}$ et $d_{\max}$ modifiés utilisant le modèle Funk-Dinger .....	93
6.5.3. Le nouveau modèle proposé: A3 and B3 .....	94
6.6. VALIDATION PRATIQUE DES MODÈLES PROPOSÉS .....	94
6.6.1. Comparaison entre les résultats des modèles de distribution granulométrique originaux et proposés .....	94
6.6.2. Validation des nouveaux modèles de granulométrie avec de nouvelles sources de granulats II et III (5 <sup>ème</sup> étape sur la Fig. 4.6) .....	98
6.7. ÉVALUATION DES PERFORMANCES D'ÉCOULEMENT DES MÉLANGES ÉTUDIÉS.....	104
6.8. ÉVALUATION DE L'ÉCO-EFFICACITÉ DES MÉLANGES BAP-ÉCO ET BSAP-ÉCO ÉTUDIÉS.....	105
<b>CHAPITRE 7 CONCLUSIONS.....</b>	<b>111</b>
<b>LISTE DES RÉFÉRENCES .....</b>	<b>115</b>



# LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1.1 Classification des formulations de BAP (Wallevik et al., 2014).....</i>	<i>5</i>
<i>Tableau 2.1 Indice de caractérisation de la sphéricité et de l'angularité des particules (Koehler, 2007).....</i>	<i>14</i>
<i>Tableau 2.2 Compositions de mélanges utilisées dans le projet Ecosmart (Fennis, 2010). .....</i>	<i>28</i>
<i>Tableau 2.3 Compositions des mélanges de béton vert, Danemark (Fennis, 2010; Glavind, M. and Munch-Petersen, 2002).....</i>	<i>33</i>
<i>Tableau 2.4 Compositions des mélanges de béton vert, Denmark (Fennis, 2010; Glavind, M. and Munch-Petersen, 2002).....</i>	<i>33</i>
<i>Tableau 2.5 Résistance à la compression de 28 jours des mélanges de béton à faible teneur en ciment, y compris les particules ultrafines. SF : fumée de silice, SP : superplastifiant PCE. (Lagerblad et Vogt, 2004) .....</i>	<i>36</i>
<i>Tableau 4.1 Compacité granulaire expérimentale et caractéristiques morphologiques de différentes sous-classes des granulats de la source I. ....</i>	<i>50</i>
<i>Tableau 4.2 Les caractéristiques morphologiques des différentes sous-classes de granulats de la source II. ....</i>	<i>51</i>
<i>Tableau 4.3 Les caractéristiques morphologiques des différentes sous-classes de granulats de la source III.....</i>	<i>52</i>
<i>Tableau 4.4 Les caractéristiques morphologiques des différentes sous-classes de granulats de la source IV.....</i>	<i>53</i>
<i>Tableau 4.5 Proportions volumétriques, compacité granulaire théorique et expérimentale, ainsi que les caractéristiques morphologiques moyennes des 20 squelettes granulaires sélectionnés (source I).....</i>	<i>55</i>
<i>Tableau 6.1 Les valeurs des q obtenues en utilisant les modèles théoriques du groupe A et la taille des particules « d » comme tailles de tamis standard. ....</i>	<i>69</i>

<i>Tableau 6.2 Les valeurs des <math>q</math> obtenues par les modèles théoriques du groupe B en utilisant la taille des particules «<math>d</math>» comme la taille morphologique moyenne de l'agrégat (valeurs <math>D_{avg}</math> dans le tableau 4.1). .....</i>	70
<i>Tableau 6.3 Proportions volumétriques et caractéristiques morphologiques moyennes des squelettes granulaires de la source II optimisées par les modèles A3, A5, B3 et B5. ....</i>	76
<i>Tableau 6.4 Proportions volumétriques et caractéristiques morphologiques moyennes des squelettes granulaires de la source III optimisées par les modèles A3, A5, B3 et B5. ....</i>	76
<i>Tableau 6.5 Proportions volumétriques et caractéristiques morphologiques moyennes des squelettes granulaires de la source IV optimisées à l'aide de différents modèles A3, A5, B3 et B5. ....</i>	77
<i>Tableau 6.6 Proportion, ouvrabilité et résistance à la compression des mélanges BAP-éco étudiés (1<sup>ère</sup> étape) fabriqués avec des squelettes granulaires SG-1 de la source I, Volume de pâte de 29%, teneur en liant de 309 kg/m<sup>3</sup>, rapport E/L de 0,60, une teneur en eau de 185,4 kg/m<sup>3</sup> et des dosages en SP et AEA de respectivement 900 et 16 ml/100 kg de liant. ....</i>	82
<i>Tableau 6.7 Classification de l'ouvrabilité en fonction de la maniabilité, de la capacité de passage et des résultats de stabilité statique des mélanges BAP-éco proportionnés avec un volume de pâte de 29% (1<sup>ère</sup> étape sur la Fig. 4.6). ....</i>	83
<i>Tableau 6.8 Les squelettes granulaires sélectionnés (SG-2) des mélanges BAP-éco fabriqués avec un volume de pâte de 29% et un niveau de maniabilité «moyen à élevé» (1<sup>ère</sup> étape sur la Fig.4.6). ....</i>	84
<i>Tableau 6.9 Proportions, ouvrabilité et résistance à la compression des BAP-éco étudiés (2<sup>ème</sup> étape) fabriqués avec des squelettes granulaires SG-2 de la source I et un <math>V_P</math> de 26% *Liant = 277 kg/m<sup>3</sup>, E/L = 0,60, Eau = 166,2 kg/m<sup>3</sup>, SP = 900 et AEA = 16 ml/100 kg de liant) ....</i>	85
<i>Tableau 6.10 Classification de l'ouvrabilité selon la maniabilité (liée au seuil d'écoulement et à la viscosité plastique), la capacité de passage et les résultats de stabilité statique des BAP-eco étudiés avec un de <math>V_P</math> 26% (2<sup>e</sup> étape). ....</i>	87



<i>Tableau 6.11 Les squelettes granulaires sélectionnés (SG-3) pour proportionner les BAP-éco avec un volume de pâte <math>V_P</math> de 26% et un niveau de maniabilité moyen à élevé (2<sup>e</sup> étape).</i>	92
<i>Tableau 6.12 Proportions, ouvrabilité et résistance à la compression des BAP-éco étudiés (3<sup>e</sup> étape) fabriqués avec des squelettes granulaires SG-3 des sources I, un volume de pâte <math>V_P</math> de 24% (Liant = 256 kg/m<sup>3</sup>, E/L = 0,60, Eau = 153,6 kg/m<sup>3</sup>, SP = 1074 et AEA = 16 ml/100 kg de liant)</i>	92
<i>Tableau 6.13 Les valeurs du paramètre <math>q</math> obtenues en utilisant les modèles théoriques du groupe A et la taille des particules «<math>d</math>» comme tailles de tamis standard pour les squelettes granulaires SG-3 (les valeurs <math>d</math>, <math>d_{min}</math> et <math>d_{max}</math> sont en mm).</i>	95
<i>Tableau 6.14 Les valeurs du paramètre <math>q</math> obtenues par les modèles théoriques du groupe B en utilisant la taille de particule «<math>d</math>» comme taille morphologique moyenne du granulat (valeurs <math>D_{avg}</math> dans le tableau 2) pour les squelettes granulaires SG-3 (les valeurs <math>d</math>, <math>d_{min}</math> et <math>d_{max}</math> sont en mm) .</i>	98
<i>Tableau 6.15 Proportions volumétriques des squelettes granulaires de la source II optimisées à l'aide des modèles A2, A3, B2 et B3, ouvrabilité et résistance à la compression des BAP-éco correspondants (<math>V_P</math> = 24%, teneur en liant = 256 kg/m<sup>3</sup>, E/L = 0,60, teneur en eau de 153,6 kg/m<sup>3</sup>, HRWR = 1074 et AEA = 16 ml/100 kg de liant).</i>	100
<i>Tableau 6.16 Proportions volumétriques des squelettes granulaires de la source III optimisées à l'aide des modèles A2, A3, B2 et B3, ouvrabilité et résistance à la compression de leurs mélanges BAP-éco correspondants (<math>V_P</math> = 24%, teneur en liant = 256 kg/m<sup>3</sup>, E/L = 0,60, teneur en eau de 153,6 kg/m<sup>3</sup>, HRWR = 1074 AEA = 16 ml/100 kg de liant).</i>	100
<i>Tableau 6.17 Émissions équivalentes de CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub>-équ) des différents constituants des BAP-éco étudiés (en kg/kg).</i>	106
<i>Tableau 6.18 Comparaison entre les indices d'intensité du potentiel de réchauffement globale (PRG) de liant (<math>b_i</math>, <math>c_s</math>) et de CO<sub>2</sub> (<math>c_i</math>, <math>c_s</math>) des BAP-éco et BSAP-éco étudiés et ceux des mélanges trouvés dans la littérature.</i>	110



# LISTE DES FIGURES

<i>Figure 2.1 Trois dimensions principales d'une particule .....</i>	<i>11</i>
<i>Figure 2.2 Graphique du facteur de grosseur de Shilstone.....</i>	<i>16</i>
<i>Figure 2.3 Courbe granulaire de référence selon Dreux .....</i>	<i>18</i>
<i>Figure 2.4 Courbes de granulométrie idéales selon Fuller, Andreasen, Funk et Dinger pour un diamètre de particule maximal de 32 mm et un diamètre de particule minimal de 63 <math>\mu\text{m}</math> (Fennis 2010).....</i>	<i>19</i>
<i>Figure 2.5 Effet de desserrement et l'effet de paroi. ....</i>	<i>20</i>
<i>Figure 2.6 Profil de compacité de deux classes de particules (<math>d_1 \gg d_2</math>) (Fennis, 2010). ..</i>	<i>21</i>
<i>Figure 2.7 Distribution optimale de la taille des particules pour LPDM en relation avec la courbe d'optimisation de Funk et Dinger. <math>\alpha_i = 0,6</math> et pour LPDM sans interaction <math>d_j</math> est 8 fois plus grande que <math>d_{j+1}</math> (Fennis, 2010) .....</i>	<i>23</i>
<i>Figure 2.8 Relation entre la compacité granulaire, le volume de granulats grossiers et le module de distribution « q »(Esmailkhanian, 2016) .....</i>	<i>35</i>
<i>Figure 4.1 Organigramme du projet de recherche.....</i>	<i>43</i>
<i>Figure 4.2 Courbes granulométriques de différentes sources de granulats (a) I, (b) II, (c) III, et (d) IV. ....</i>	<i>45</i>
<i>Figure 4.3 Le compacteur à cisaillement giratoire (ICT-100R) .....</i>	<i>48</i>
<i>Figure 4.4 (a) 3D MAXscan, (b) Analyse d'images 3D du granulat scanné et de ses coupes 2D, (c) Hitachi S-3400N et (d) microscopes optiques, (e) et (f) exemples d'images microscopiques prises (g) des images binaires 2D converties, (h) la configuration 2D du granulat et (i) sa coque convexe correspondante. ....</i>	<i>49</i>
<i>Figure 4.5 Modèles théoriques de Fuller-Thompson avec les valeurs de q (a) 0,4 et (b) 0,5 et les distributions granulaires expérimentales sélectionnés avec différents rapports S/G de 0,45 à 0,60. ....</i>	<i>56</i>
<i>Figure 4.6 La procédure expérimentale pour déterminer la courbe de granulométrie idéale pour les BAP-éco et BSAP-éco. ....</i>	<i>61</i>

<i>Figure 6.1 Corrélation entre les caractéristiques morphologiques des mélanges granulaires étudiés: RC par rapport à <math>D_{avg} \times AR</math>.</i>	67
<i>Figure 6.2 Comparaison entre les courbes de granulométrie expérimentales et théoriques en utilisant des modèles du groupe A (c.-à-d. «D» comme tailles de tamis standard), y compris (a) A1, (b) A2, (c) A3, (d) A4 et (e) A5 pour le mélange granulaire M3.</i>	71
<i>Figure 6.3 Comparaison entre les courbes de granulométrie expérimentales et théoriques en utilisant des modèles du groupe B (c.-à-d. «D» comme diamètres morphologiques <math>D_{avg}</math>), y compris (a) B1, (b) B2, (c) B3, (d) B4 et (e) B5 pour le mélange granulaire M3.</i>	72
<i>Figure 6.4 Comparaison entre la précision des modèles de granulométrie étudiés avec les modèles Fuller-Thomson (Fuller et Thomson, 1907) (A1 et B1): (a) <math>R^2</math> et (b) EQM des prédictions des modèles A2-A5 versus <math>R^2</math> et EQM des prédictions du modèle A1, ainsi que (c) <math>R^2</math> et (d) EQM des prédictions des modèles B2-B5 versus <math>R^2</math> et EQM des prédictions du modèle B1.</i>	73
<i>Figure 6.5 Les valeurs des q obtenues par les modèles (a) B3 et (b) B5 (valeurs de tailles morphologiques) par rapport à celles obtenues par les modèles A3 et A5 (valeurs de tailles de tamis standard).</i>	74
<i>Figure 6.6 Comparaisons entre les caractéristiques morphologiques des mélanges granulaires II, III et IV obtenues en utilisant A3 et B3 et celles obtenues en utilisant les modèles A5 et B5, (a) <math>D_{avg} \times AR</math> et (b) RC,</i>	77
<i>Figure 6.7 Comparaisons entre les distributions granulométriques des mélanges formulés avec les sources de granulat (a, b) II, (c, d) III et (e, f) IV, optimisées par (a, c, e) modèles A3 et A5, et (b, d, f) modèles B3 et B5.</i>	78
<i>Figure 6.8 Classification des mélanges BAP-éco proportionnés avec un volume de pâte de 29% (1<sup>ère</sup> étape de la procédure expérimentale sur la Fig. 4.6), corrélant (a) <math>\Delta_{J-Ring}</math> (capacité de passage) par rapport à un étalement (fluidité), ainsi que la ségrégation statique indice (stabilité) par rapport à (b) étalement (fluidité), et (c) valeurs de <math>\Delta_{J-Ring}</math> (capacité de passage), les zones vertes et rouge se réfèrent respectivement aux zones de niveau d'ouvrabilité «moyenne à élevée» et «faible»,</i>	83

<i>Figure 6.9 Comparaison entre les résultats d'ouvrabilité, (a) étalement, (b) V-Funnel, (c) indice de ségrégation statique, et (d) <math>\Delta_{J-Ring}</math> des BAP-éco fabriqués avec les volumes de pâte <math>V_P</math> de 26% et 29%. .....</i>	<i>87</i>
<i>Figure 6.10 Classification des BAP-éco proportionnés avec un volume de pâte de 26% (2<sup>ème</sup> étape), (a) VF vs. étalement, (b) <math>\Delta_{J-Ring}</math> avec le temps d'écoulement VF, (c) ISS avec VF, et (d) <math>\Delta_{J-Ring}</math> avec étalement. Les zones verte et rouge se réfèrent respectivement aux niveaux d'ouvrabilité «moyenne à élevée» et «faible». .....</i>	<i>88</i>
<i>Figure 6.11 Comparaison entre les résultats d'ouvrabilité, (a) étalement, (b) Temps d'écoulement, (c) indice de ségrégation statique, et (d) <math>\Delta_{J-Ring}</math> des mélanges BAP-eco de volumes de pâte avec 24% et 29%. .....</i>	<i>92</i>
<i>Figure 6.12 Comparaison entre les distributions granulométriques des modèles (a) M3 et F-T avec q de 0,40, (b) les modèles M11 et F-T( Fuller-Thomson) avec q de 0,45, et (c) les mélanges granulaires M3 et M11. ....</i>	<i>93</i>
<i>Figure 6.13 Comparaison entre les courbes de distribution expérimentales et théoriques en utilisant les modèles du groupe A («d» comme tailles de tamis standard) et du groupe B («d» comme diamètres morphologiques <math>D_{avg}</math>), y compris (a) A1, (b) A2, (c) A3, (d) B1, (e) B2 et (f) B3 pour le mélange granulaire M3. ....</i>	<i>96</i>
<i>Figure 6.14 Comparaison entre les courbes de distribution expérimentales et théoriques en utilisant les modèles du groupe A («d» comme tailles de tamis standard) et du groupe B («d» comme diamètres morphologiques <math>D_{avg}</math>), y compris (a) A1, (b) A2, (c) A3, (d) B1, (e) B2 et (f) B3 pour le mélange granulaire M11. ....</i>	<i>97</i>
<i>Figure 6.15 Distributions granulométriques des mélanges granulaires fabriqués par des sources de granulats (a, b) II, (c, d) III et optimisées par (a, c) A2 et A3 et (b, d) modèles de granulométrie B2 et B3. ....</i>	<i>101</i>
<i>Figure 6.16 Étalement des mélanges proportionnés avec la source des grnaulats II et en utilisant les modèles de granulométrie de (a) A2, (b) A3, (c) B2 et (d) B3 (les images ont été capturées avec la même échelle). ....</i>	<i>102</i>
<i>Figure 6.17 Évaluation des performances d'écoulement des formulations étudiés. ....</i>	<i>105</i>



## CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Le béton autoplaçant (BAP) est une nouvelle classe de béton caractérisé par une grande déformabilité. Le BAP peut s'écouler à travers des coffrages ayant des configurations géométriques complexes sous sa propre masse, sans vibration ni ségrégation. La formulation du BAP a des implications importantes sur la manière dont le béton est spécifié, produit et placé. L'utilisation du BAP peut accroître la productivité de la construction, améliorer la sécurité sur le chantier et améliorer les propriétés mécaniques et la qualité des structures. Le BAP est caractérisé par un faible seuil d'écoulement pour assurer une bonne déformabilité et une viscosité adéquate pour assurer une bonne stabilité. Les trois propriétés essentielles du BAP sont sa capacité à s'écouler sous son propre poids (capacité de remplissage), sa capacité à passer à travers un renforcement encombré (capacité de passage) et sa capacité à résister à la ségrégation (stabilité). Le comité 237 de l'Institut Américain du béton définit le BAP comme un « béton à haute fluidité, sans ségrégation, qui peut se répandre, remplir le coffrage et encapsuler l'armature sans aucune consolidation mécanique ». L'Institut canadien du béton préfabriqué / précontraint (2003) définit le BAP comme « un béton extrêmement maniable qui peut traverser sous son propre poids des éléments structuraux densément renforcés ou de géométries complexes et remplir adéquatement les coffrages sans ségrégation ni ressuage excessif sans qu'il soit nécessaire de le consolider par vibration ». La formulation de mélanges nécessite souvent plus d'efforts pour le BAP que pour le béton conventionnel. Le choix exact des proportions dépend de la disponibilité des matériaux et des exigences de performance. Par exemple, la capacité de passage peut avoir peu ou pas d'importance dans certains cas, alors que la résistance à la ségrégation est nécessaire dans tous les cas. Cependant, les coûts des matériaux utilisés dans le BAP sont généralement plus élevés que ceux utilisés dans le béton conventionnel et la production de BAP peut nécessiter une plus grande expertise technique et des mesures de contrôle de la qualité. La maniabilité des BAP nécessite l'incorporation d'un superplastifiant de grande efficacité pour garantir que le béton puisse couler sous sa propre masse. De plus, le rapport eau-liant (E/L) est réduit

ou un agent de viscosité (AV) est utilisé pour garantir que le béton résiste à la ségrégation. Les proportions de BAP, comparées aux proportions de mélange de béton conventionnel, présentent généralement une combinaison de volume de pâte supérieur, de teneur en poudre plus élevée, de faible rapport E/L, de teneur en granulat grossier plus faible et d'une taille maximale de granulat plus petite (Koehler, 2007).

Le BAP a été développé au Japon en 1980 pour répondre au manque de main-d'œuvre qualifiée et à la nécessité d'améliorer la durabilité des structures. Okamura a identifié pour la première fois le besoin de BAP et son prototype a été mis au point en 1988 (Ouchi, 2001). Collepari précise toutefois que les bétons autonivelant ont été étudiés dès 1975 et utilisés dans des applications commerciales en Europe, aux États-Unis et en Asie dans les années 1980 (Collepari, 2003). Le recours au BAP a progressivement augmenté dans le monde entier depuis les années 1980, notamment à la fin des années 1990. Le pont Akashi Kaikyo au Japon (Tanaka *et al.*, 1993) est l'une des premières applications de haut niveau du BAP. À l'origine, l'application principale du BAP était dans les usines de préfabrication; cependant, l'utilisation du BAP dans les applications de béton prêt à l'emploi s'est rapidement développée.

Le BAP est très sensible aux changements de propriétés et de proportions des matériaux et nécessite, par conséquent, un contrôle de qualité accru. De plus, les conséquences des écarts de maniabilité sont plus importantes pour le BAP. Par exemple, une légère modification de la teneur en eau peut avoir un effet minime sur le béton conventionnel, mais peut conduire à une ségrégation sévère du BAP (Koehler, 2007). Les avantages et les inconvénients du BAP doivent être évalués par chaque producteur et pour chaque application. En général, les avantages du BAP peuvent inclure (Koehler, 2007; Okamura, 1988; Ozawa *et al.*, 1989) :

- Amélioration de la capacité du béton à s'écouler dans des espaces complexes et entre des armatures encombrées.
- Finition améliorée de la surface et réduction de la nécessité de réparer les défauts tels que les nids d'abeille.
- Réduction des coûts de construction en raison de la réduction des coûts de main-d'œuvre et des coûts d'achat d'équipement et de maintenance.



- Augmentation de la vitesse de construction grâce au nombre moins élevé de tâches de construction.
- Déchargement plus rapide des camions de béton prêt à l'emploi.
- Conditions de travail améliorées avec moins d'accidents grâce à l'élimination des vibrateurs.
- Amélioration de la durabilité et de la résistance du béton durci dans certains cas.
- Réduction du bruit généré par les vibrateurs.

Par ailleurs, les inconvénients du BAP peuvent inclure :

- Augmentation du coût des matériaux, en particulier pour les adjuvants et les matériaux à base de ciment.
- Augmentation des coûts de coffrage en raison d'éventuelles pressions plus élevées.
- Expertise technique accrue requise pour développer et contrôler les mélanges.
- Variabilité accrue dans les propriétés, en particulier la maniabilité.
- Exigences de contrôle de la qualité accrues.
- Diminution des propriétés de durcissement y compris éventuellement du module d'élasticité et de la stabilité dimensionnelle, en raison de facteurs tels que des volumes de pâte élevés ou une faible teneur en granulats grossiers.
- Délai de prise différé dans certains cas en raison de l'utilisation d'adjuvants.
- Augmentation du risque et de l'incertitude associée à l'utilisation d'un nouveau produit.

Dans la production de béton, le ciment est le matériau le plus cher et peut représenter jusqu'à 60 % du coût total des matériaux (Quiroga, 2003). Son procédé de fabrication est également le plus gros contributeur de gaz à effet de serre et le plus consommateur d'énergie et de ressources. Environ 5 % des émissions mondiales de dioxyde de carbone sont attribuables à la fabrication du ciment (ONU Changements climatiques Infos, 2018). La fraction de pâte d'un mélange de béton représente généralement 25 % à 40 % du volume total. En raison de la quantité considérable de ciment, il faut s'attendre à une augmentation des coûts de production du BAP. D'une perspective économique et environnementale, la production d'un BAP écologique (BAP-éco) est une alternative prometteuse qui est de plus en plus en vue.

Le développement des BAP-éco repose essentiellement sur la combinaison des avantages du BAP (fluidité, homogénéité et stabilité) tout en utilisant une teneur en liant plus faible que celle d'un BAP normal. Ainsi, l'utilisation du BAP est moins avantageuse en matière de durabilité en raison de problèmes environnementaux et économiques (Figueiras *et al.*, 2009). À cet égard, un BAP écologique (BAP-éco) avec une faible teneur en poudre pourrait présenter un grand intérêt puisqu'il incarne les avantages de l'auto-consolidation et de l'écologie tout en réduisant le coût des matériaux (Mueller *et al.*, 2014).

Dans la littérature, le terme BAP-éco n'est pas bien défini et est utilisé globalement pour traiter les BAP à teneur réduite en ciment. Généralement, dans de tels travaux de recherche, la quantité de matériaux en poudre n'est pas limitée. Ainsi, le BAP-éco dans cette recherche fait référence à un type de BAP avec une teneur totale en poudre inférieure à  $315 \text{ kg/m}^3$  et une résistance à la compression de 28 jours dans la plage de 25 à 35 MPa. Le BAP-éco peut être conçu pour être utilisé dans diverses applications, incluant le béton prêt à l'emploi, où les caractéristiques de durabilité normales suffisent, telles que la construction résidentielle et commerciale. Ce concept a été proposé pour la première fois par (Wallevik *et al.*, 2009) et le projet pilote a été réalisé par (Mueller, 2012).

La diminution de la teneur en poudre est une alternative généralement utilisée pour produire un BAP-éco (Esmailkhanian, B. *et al.*, 2017). Les formulations de BAP peuvent être classées en fonction de leur teneur en liant (Tableau 1.1) (Wallevik *et al.*, 2014). Par ailleurs, les bétons semi-autoplaçants (BSAP) étant intermédiaires entre les BAP et les bétons conventionnels vibrés possèdent une ouvrabilité plus importante que le béton conventionnel (diamètre d'étalement compris entre 400 et 550 mm), mais ne possèdent pas les mêmes caractéristiques que les BAP. Les BSAP sont proportionnés avec un volume en pâte relativement plus faible que les BAP. Ainsi, le choix des proportions et caractéristiques des granulats est une étape importante dans la formulation des BSAP. Cependant, l'influence des caractéristiques des granulats sur ces types de bétons est encore peu connue.

Tableau 1.1 Classification des formulations de BAP (Wallevik et al., 2014)

SCC type	Powder content (kg/m <sup>3</sup> )
Rich SCC	575
Regular powder content	515 ± 40
Lean SCC	425 ± 40
Green SCC	355 ± 40
<b>Eco-SCC</b>	<b>≤ 315</b>
EcoCrete-SCC	≤ 260
EcoCrete-Xtreme	≤ 220

Une partie du ciment peut être remplacée par des ajouts cimentaire, mais il existe un potentiel plus important de réduction de la teneur en ciment nécessaire aux mélanges de béton en optimisant la distribution granulométrique des granulats dans les mélanges. L'optimisation de la compacité des particules de granulats améliorera : i) la durabilité et les coûts de production du béton en réduisant la teneur en ciment requise; ii) la durabilité en diminuant sa perméabilité et son potentiel de séchage par fissuration due au retrait; iii) la maniabilité en réduisant le potentiel de ségrégation; et iv) les performances structurelles en réduisant la porosité et en augmentant le volume total de granulat. La forme et la texture des granulats ont un effet significatif sur la compacité granulaire des granulats individuels et, par conséquent, un potentiel d'optimisation des granulats mélangés.

## 1.1. Approche de recherche

Concevoir une formulation de BAP à faible teneur en poudre ( $\leq 315 \text{ kg/m}^3$ ) est un défi, car les trois critères essentiels d'auto-consolidation, à savoir la capacité de passage, la capacité de remplissage et la stabilité, sont principalement liés à une teneur plus élevée en poudre dans le BAP. L'approche adoptée dans cette étude pour produire un BAP-éco est essentiellement basée sur la réduction du volume de pâte en optimisant le squelette granulaire et en utilisant un ciment ternaire. Les propriétés des granulats, telles que la distribution granulométrique, la forme, la texture, la rugosité et l'angularité des particules sont étudiées, car ces propriétés ont une influence importante sur l'ouvrabilité et les

résistances mécaniques du béton. Dans la littérature, l'effet des propriétés des particules solides, notamment la morphologie des particules, n'a pas été étudié.

L'étude est réalisée en différentes étapes et le mémoire est organisé en six chapitres principaux :

- Le Chapitre 1 présente une introduction générale sur les BAP, y compris la définition, le principe de la formulation, les propriétés, les avantages et les inconvénients de l'utilisation de cette classe de béton et la production de BAP à faible impact environnemental. En outre de ces éléments, le chapitre comprend une présentation des recherches antérieures sur la formulation de BAP-éco;
- Le Chapitre 2 comprend une synthèse de l'état des connaissances scientifiques sur les granulats couramment utilisés dans le domaine de la construction, y compris leurs définitions, leurs classifications, leurs types, etc. De plus, ce chapitre comprend une présentation détaillée sur la formulation de BAP-éco. Ce chapitre présente également des notions sur la rhéologie des suspensions cimentaires, ainsi que les différentes procédures expérimentales utilisées pour mesurer les propriétés rhéologiques de ces suspensions. Chaque aspect contient des références à des études expérimentales de la production du BAP;
- Le Chapitre 3 présente la problématique et les objectifs de l'étude;
- Le Chapitre 4 expose le plan expérimental ainsi que les matériaux et méthodes utilisés. L'objectif principal de ce programme est de produire des BAP et BSAP à faible teneur en pâte;
- Le Chapitre 5 présente les nouveaux modèles de distribution granulométrique proposés;
- Le Chapitre 6 présente les résultats expérimentaux obtenus dans le cadre de cette étude, leurs analyses, ainsi que leur discussion;
- Le Chapitre 7 est le dernier chapitre et comprend des conclusions générales formulées à la suite des résultats présentés.

## CHAPITRE 2 ÉTAT DE L'ART

### 2.1. Impact environnemental du béton

Le ciment est considéré comme le composant de base ayant l'impact environnemental le plus élevé en ce qui concerne les émissions de CO<sub>2</sub> et la consommation d'énergie (Fennis, 2010; Mehta, 2001). L'industrie du ciment contribue pour environ 5 % aux émissions mondiales de CO<sub>2</sub> (Worrell *et al.*, 2001). Selon Mehta, la production mondiale annuelle de ciment de 1,6 milliard de tonnes représente environ 7 % de la charge mondiale de dioxyde de carbone dans l'atmosphère (Mehta, 2001). Il est reporté qu'en 2006, les émissions totales de CO<sub>2</sub> issues de la production de ciment étaient estimées à 348 millions de tonnes métriques sur les 83 030 millions de tonnes émises dans le monde (Boden *et al.*, 2009). Par ailleurs, environ 12,6 milliards de tonnes de béton sont produites dans le monde (Glavind, M., et Munch-Petersen 2002). Pour chaque tonne de béton, les émissions de CO<sub>2</sub> liées à la production de béton et principalement à la production de ciment sont comprises entre 0,1 et 0,2 tonne par tonne de béton produit. Ces chiffres ont été utilisés pour une première estimation de la réduction possible des émissions de CO<sub>2</sub> en utilisant du béton écologique. Par conséquent, la réduction de la teneur en ciment-clinker a des effets positifs sur l'évaluation du cycle de vie du béton dans l'environnement et peut être obtenue par l'optimisation de la conception du mélange (Proske *et al.*, 2013).

En ce qui concerne la conception des mélanges, il existe deux approches générales pour réduire les émissions totales de CO<sub>2</sub> du béton (Habert et Roussel, 2009). Une stratégie consiste à réduire l'utilisation de ciment Portland ordinaire en minimisant la teneur totale en poudre et en remplaçant le clinker par des ajouts cimentaires tout en maintenant la même classe de performances (Bilodeau et Mohan Malhotra, 2000; Proske *et al.*, 2013). L'autre méthode consiste à augmenter la quantité de matériaux à base de ciment, y compris le ciment Portland ordinaire, par unité de volume afin d'améliorer les performances mécaniques et la

durée de vie du béton et de réduire ainsi le volume total de béton nécessaire à la construction d'une certaine structure (Aïtcin, 2000; Damtoft *et al.*, 2008; Habert et Roussel, 2009).

## **2.2. Remplacement du ciment**

Il existe une approche largement utilisée pour produire un BAP-éco qui consiste à remplacer le ciment par des ajouts cimentaires (Damtoft *et al.*, 2008; Flatt *et al.*, 2012). Le clinker Portland peut être remplacé par d'autres matériaux tels que le laitier de haut fourneau, la fumée de silice ou les cendres volantes (Long *et al.*, 2015; Rosković et Bjegović, 2005). Ces matériaux sont mélangés ou parfois même broyés ensemble à l'usine pour obtenir un produit ayant des propriétés constantes (Fennis, 2010). Le produit combiné est composé de telle manière que lorsqu'il est utilisé dans le béton, il sera aussi résistant que le ciment Portland ordinaire à 28 jours.

Une deuxième possibilité pour remplacer le ciment est l'utilisation d'ajouts ou fillers. De cette manière, tout type de ciment peut être remplacé partiellement par des matériaux fins tels que des cendres volantes, du laitier de haut fourneau, de la poudre de verre, ou des poudres minérales inertes telles que la poudre de quartz (Esmailkhanian, 2016).

### **2.2.1. Matériaux remplaçant le ciment**

Le ciment peut être remplacé par des ajouts cimentaires et des fillers. Les ajouts cimentaires peuvent être définis comme des particules réactives qui forment un gel de ciment lorsqu'ils réagissent avec de l'eau ou une solution de l'hydroxyde de calcium. Selon le type de liant utilisé, la composition chimique et la structure interne du gel de ciment peuvent différer. Par conséquent, les propriétés du béton peuvent varier de manière distincte lorsque différents types de liants sont utilisés (Damtoft *et al.*, 2008; Fennis, 2010; Flatt *et al.*, 2012; Mohammed *et al.*, 2013). Par exemple, la fumée de silice réagit plus rapidement que les cendres volantes en raison de leur finesse. De sorte que la finesse des particules et l'alcalinité de l'environnement contrôlent la vitesse de réaction. Il est connu que l'utilisation de cendre volante améliore la maniabilité du béton en réduisant la demande en eau nécessaire pour avoir un certain étalement.

Les fillers ne forment pas de gel. Toutefois, ils augmentent non seulement la compacité granulaire des particules tout en diminuant la demande en eau, mais ils créent également une meilleure liaison entre le gel de ciment et les granulats. La raison en est que les fillers fins influencent la formation et l'orientation de gros cristaux dans le gel de ciment (Fennis, 2010; Kadri *et al.*, 2010; Poppe et De Schutter, 2005).

La maniabilité du béton est influencée par la présence des particules fines. L'effet de l'ajout de fillers sur la maniabilité dépend de la composition et des propriétés d'origine de ce filler. En général, deux théories permettant de prédire la maniabilité d'un mélange de béton sont adoptées : la théorie de la couche d'eau et la théorie de la compacité. La théorie de la couche d'eau suppose que la demande en eau d'un mélange dépend de la surface des particules dans ce mélange. Augmenter la surface en ajoutant de petites particules, augmentera la demande en eau (Fennis, 2010; Hunger et Brouwers, 2009). La théorie de la compacité suppose que l'ajout de fines particules à une structure de particules contribue à combler les vides entre les particules, ne laissant qu'un minimum d'espace pour l'eau. De cette façon, l'ajout de fines particules réduira les besoins en eau (De Larrard, 1999; Wong et Kwan, 2008).

Kronl f a déclaré que la maniabilité du béton avec des fillers fins variait dans une large mesure en raison de la floculation de petites particules (Kronl f, 1997). Dans les mélanges sans superplastifiant, les particules fines sont floculées et ne peuvent pas adéquatement remplir les espaces, ce qui explique pourquoi elles nécessitent souvent plus d'eau. La première condition pour appliquer la théorie de la compacité est l'utilisation d'un superplastifiant pour disperser les particules fines et éviter ainsi leur floculation. Il a été reporté que les propriétés rhéologiques et la demande en eau des mortiers dépendent fortement des propriétés du granulat fin (Westerholm *et al.*, 2008). La viscosité plastique augmente en raison d'un effet de forme des particules et du frottement inter-particulaire accru. Les effets peuvent être éliminés ou réduits en augmentant le volume de pâte du mortier ou du béton sinon en utilisant un superplastifiant efficace (Westerholm *et al.*, 2008).

Malgré le désaccord sur l'influence des fillers sur la demande en eau du béton, la plupart des chercheurs conviennent que l'ajout des fillers au ciment améliorera les résistances mécaniques. En effet, l'ajout de particules plus petites que les particules de ciment

amélioreront le gain de résistance initial (Kaufmann *et al.*, 2004; Lagerblad et Vogt, 2004). En général, l'ajout de fines particules permet d'obtenir un béton plus résistant. Cela peut être causé par une réduction de la demande en eau, mais ce n'est pas toujours le cas, comme nous l'avons déjà expliqué. Selon (Kaufmann *et al.*, 2004), des résistances élevées ont été obtenues grâce à un rapport eau/ciment réduit et à l'effet de remplissage des fines particules.

## **2.3. Granulats dans le béton**

Généralement, Les BAP ont une teneur en granulat total plus faible, d'une plus grande quantité de granulat fin par rapport à un granulat grossier et d'une taille maximale de granulat plus petite. (Koehler, 2007). Bien que le BAP puisse être produit avec une large gamme de sources de granulat, l'optimisation de leurs caractéristiques peut permettre d'améliorer les propriétés d'écoulement et de réduire la demande en matériaux à base de ciment, en eau et en adjuvants chimiques.

### **2.3.1. Description des propriétés des granulats**

Des informations limitées sont disponibles sur la sélection des granulats pour la formulation des BAP. L'optimisation de la compacité granulaire des granulats améliore les propriétés et le coût de production du béton en réduisant la teneur en ciment requise, sans affecter sa durabilité et sa perméabilité. La forme et la texture des granulats ont un effet significatif sur la compacité granulaire des granulats individuels et par conséquent, sur le potentiel d'optimisation des granulats dans les mélanges.

#### **2.3.1.1. Évaluation des propriétés morphologiques des granulats**

Les propriétés morphologiques des granulats pourraient être classées selon différentes caractéristiques, telles que le diamètre des granulats et la distribution granulométrique. Ces caractéristiques permettent de décrire la taille, la forme (arrondi ou allongé) des granulats, la rugosité et la surface spécifique des particules, ainsi que la texture de surface (Koehler, 2007).



La description des particules peut être basée sur des mesures bidimensionnelles ou tridimensionnelles; les mesures bidimensionnelles peuvent être biaisées, en particulier pour les matériaux à faible sphéricité (Garboczi *et al.*, 2001). Les propriétés de forme 3D des granulats peuvent affecter de manière significative l'ouvrabilité (Cepuritis *et al.*, 2016; Erdoğan *et al.*, 2008; Estephane *et al.*, 2019; Geiker *et al.*, 2002; Hafid *et al.*, 2016; Ostrowski *et al.*, 2018; Sokhansefat *et al.*, 2019; Tierrie *et al.*, 2016; Westerholm *et al.*, 2008; Zuo *et al.*, 2018), les performances mécaniques (Felekoğlu, 2007; Frazao et Sbrighi, 1980; Hong *et al.*, 2014; Molugaram *et al.*, 2014; Ostrowski *et al.*, 2018; ÖZEN, 2007; Polat *et al.*, 2013; Rocco et Elices, 2009) et la durabilité (Xiao *et al.*, 2018; Zheng *et al.*, 2014). Il n'est pas facile de décrire la forme 3D des éléments irréguliers comme les granulats. Par exemple, Powers définit les granulats par un facteur de forme, qui est représenté dans l'Équation 2.1 (Koehler, 2007; Powers, 1968). La forme peut également être définie en matière de lancement et d'élongation (Koehler, 2007), qui sont présentées dans les Équations 2.2 et 2.3.

$$\text{Facteur de forme} = \frac{L * S}{I^2} \quad \text{Équation 2.1}$$

$$\text{Lancement} = \frac{I}{S} \quad \text{Équation 2.2}$$

$$\text{Coefficient d'allongement} = \frac{L}{I} \quad \text{Équation 2.3}$$

Où « L » est la dimension la plus longue, « S » est la dimension la plus courte et « I » la dimension intermédiaire comme montrée à la Figure 2.1.

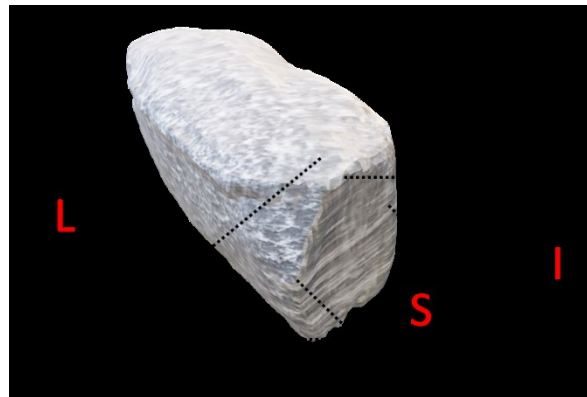


Figure 2.1 Trois dimensions principales d'une particule

Bien que la forme des granulats puisse être décrite comme la manière dont la particule se rapproche de la sphère ou de la surface d'une sphère équivalente, ce facteur est utilisé pour décrire les facteurs de forme tridimensionnelle. Il existe d'autres facteurs de forme décrivant la forme des granules 2D. Le rapport d'aspect est l'un de ces facteurs et il est défini comme le rapport entre la longueur la plus courte et la plus longue longueur. Le facteur de forme 2D proposé par (Cox, 1927) est la circularité. La circularité peut être calculée selon l'Équation 2.4.

$$\emptyset = \frac{4.\pi.A}{P_{Rugose}^2} \quad \text{Équation 2.4}$$

Où  $\emptyset$  est la circularité,  $A$  est la surface projetée de la particule et  $P_{Rugose}$  est le périmètre de la projection. La texture des particules fait référence à la qualité de leur surface.

Il existe généralement deux types de surfaces : lisse et rugueuse. En règle générale, lorsque les granulats proviennent du broyage, ils présentent des surfaces rugueuses. Par contre, lorsqu'ils proviennent de gravières ou de sablières, ils présentent des surfaces lisses (Kamal *et al.*, 2011). Hong a étudié l'effet de la rugosité de surface des granulats grossiers sur la force de liaison de l'interface entre les granulats grossiers et le mortier à l'aide d'un scanneur 3D (Hong *et al.*, 2014). Hong a conclu que pour les surfaces de granulats plus rugueuses utilisées dans le béton, les propriétés mécaniques les plus élevées étaient obtenues. L'indice de rugosité calculé selon l'Équation 2.5.

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |r_i - \bar{r}| \quad \text{Équation 2.5}$$

Où «  $r_i$  » est la distance entre le point d'échantillonnage «  $i$  » sur la surface et le centre du granulat, «  $\bar{r}$  » est la distance moyenne de tous les points d'échantillonnage sur la surface jusqu'au centre de l'agrégat et «  $n$  » est le nombre total de points d'échantillonnage.

Une autre méthode pour évaluer la rugosité des granulats utilisés par (Bouwman *et al.*, 2004) : le facteur de rugosité a été calculé en fonction du périmètre mesuré avec une résolution inférieure ( $P_{lisse}$ ) et une résolution plus élevée ( $P_{Rugose}$ ), comme il est montré dans l'Équation 2.6.

$$R = 1 - \frac{P_{Lisse}}{P_{Rugose}} \quad \text{Équation 2.6}$$

L'angularité exprime la forme des arêtes et des coins. C'est le rapport entre le rayon moyen « r » de courbure des coins et des arêtes d'une particule et le rayon de courbure de la sphère inscrite « R », comme montré dans l'Équation 2.7.













$$Angularité = \frac{r}{R} \quad \text{Équation 2.7}$$

L'échelle proposée par (Koehler, 2007) classe la forme du granulat. L'indice est égal à l'unité, lorsque le granulat a une forme sphérique. Au contraire, l'indice est égal à 5 pour le granulat allongé comme représenté au Tableau 2.1.

L'effet de la forme, de l'angularité et de la surface rugueuse peut être résumé dans les points suivants (Koehler, 2007) :

- Une forme de particule irrégulière conduit à un mélange homogène en améliorant la résistance à la ségrégation.
- Une forme de particule sphérique polie diminue le frottement interparticulaire, de sorte que la compacité granulaire et la maniabilité augmentent.
- Une particule brute angulaire produit un mélange stable avec une faible compacité granulaire.
- Dans le béton, la texture de surface influence également l'adhésion de la matrice de ciment au granulat. La liaison entre la matrice de ciment et les granulats naturels est très bonne, tandis que les granulats lissés et la matrice de ciment ont une connexion faible. Dans un mélange de particules sphériques et irrégulières, la compacité granulaire des sphères n'est pas significativement dégradée par les particules irrégulières jusqu'à ce que le mélange contienne environ 10 % de particules irrégulières. Ainsi, l'addition de particules irrégulières peut ne pas nuire à la compacité granulaire des sphères, mais peut améliorer la résistance compacte en fournissant plus de frottement inter-particulaire.

Tableau 2.1 Indice de caractérisation de la sphéricité et de l'angularité des particules (Koehler, 2007)

	Visual Shape and Angularity Rating ( $R_{s,A}$ )				
	Well-Shaped, Well Rounded			Poorly Shaped, Highly Angular	
					
	1	2	3	4	5
<b>Shape</b>	Most particles near equidimensional 	Modest deviation from equidimensional 	Most particles not equidimensional but also, not flat or elongated 	Some flat and/or elongated particles 	Few particles equidimensional; abundance of flat and/or elongated particles 
<b>Angularity</b>	Well-rounded 	Rounded 	Sub-angular or sub-rounded 	Angular 	Highly angular 
<b>Examples</b>	Most river/glacial gravels and sands	Partially crushed river/glacial gravels or some very well-shaped manufactured sands	Well-shaped crushed coarse aggregate or manufactured sand with most corners $> 90^\circ$	Crushed coarse aggregate or manufactured sand with some corners $< 90^\circ$	Crushed coarse aggregate or manufactured sand with many corners $\leq 90^\circ$ and large convex areas

### 2.3.2. Granulométrie

La production de béton de haute qualité est étroitement liée aux granulométries des granulats. La taille maximale des granulats est un paramètre majeur affectant la fluidité, la demande en pâte et en eau. Par exemple, une plus grande taille de granulat donne une plus grande fluidité par rapport à une plus petite, pour un contenu fixe en eau et en pâte.

Une variété de techniques doit être employée pour caractériser la classification complète, qui peut aller de l'ordre du nanomètre à la dizaine de millimètres. Lors de l'obtention d'un spécimen pour l'analyse de granulométrie granulaire, des techniques d'échantillonnage appropriées sont essentielles en raison de la tendance des matériaux granulaires à se séparer par taille.

### **2.3.2.1. Évaluation des propriétés morphologiques des granulats**

C'est l'une des méthodes importantes pour mesurer la granulométrie des granulats. Les normes ASTM C 136 (ASTM International, 2001) et ASTM C 117 (ASTM, 2012) sont utilisés respectivement pour les granulats supérieurs à 75  $\mu\text{m}$  et pour les granulats inférieurs à 75  $\mu\text{m}$  (en lavant l'échantillon sur un tamis de 75  $\mu\text{m}$ ).

### **2.3.2.2. Méthode de Shilstone**

Une méthode empirique pour sélectionner des granulats pour la formulation du béton est proposée (Shilstone, 1990; Shilstone et Shilstone, 2002). Selon Shilstone, la classification est l'information la plus importante que nous ayons pour les granulats. Les granulats sont divisés en trois catégories : la fraction grossière « Q » est le matériau retenu sur le tamis de 3/8 po, l'intermédiaire « I » est le matériau qui traverse le tamis 3/8 de pouce et retenu dans # 8, et les matériaux fins « W » sont les granulats passant dans # 8 et retenus sur le tamis n° 200. Les vides entre les grosses particules sont remplis par la taille intermédiaire.

(Shilstone et Shilstone, 2002) ont défini plusieurs domaines de choix des granulats à partir de deux facteurs : le facteur de maniabilité « W » et le facteur de grossièreté «  $Q/(Q+1)$  », comme le montre la Figure 2.2. La zone 1 représente la zone de classement discontinu résistant moins à la ségrégation, la zone 2 est la zone de bonne granulométrie des bétons usuels pour différentes utilisations, la zone 3 est inférieure à la zone 2 composée de granulat plus gros, zone 4 pour les bétons collants, la zone 5 est la zone rocheuse des bétons massiques, la zone 2 est la zone de l'optimum (la zone souhaitée pour tous les bétons).

Shilstone décrit également le mortier comme étant la combinaison entre la pâte et le sable moyen. Shilstone 2002 a indiqué que la teneur en mortier se situait entre 48 et 66 % selon les exigences de la construction. Le mortier requis augmente avec la diminution de la quantité de taille intermédiaire (Koehler, 2007).

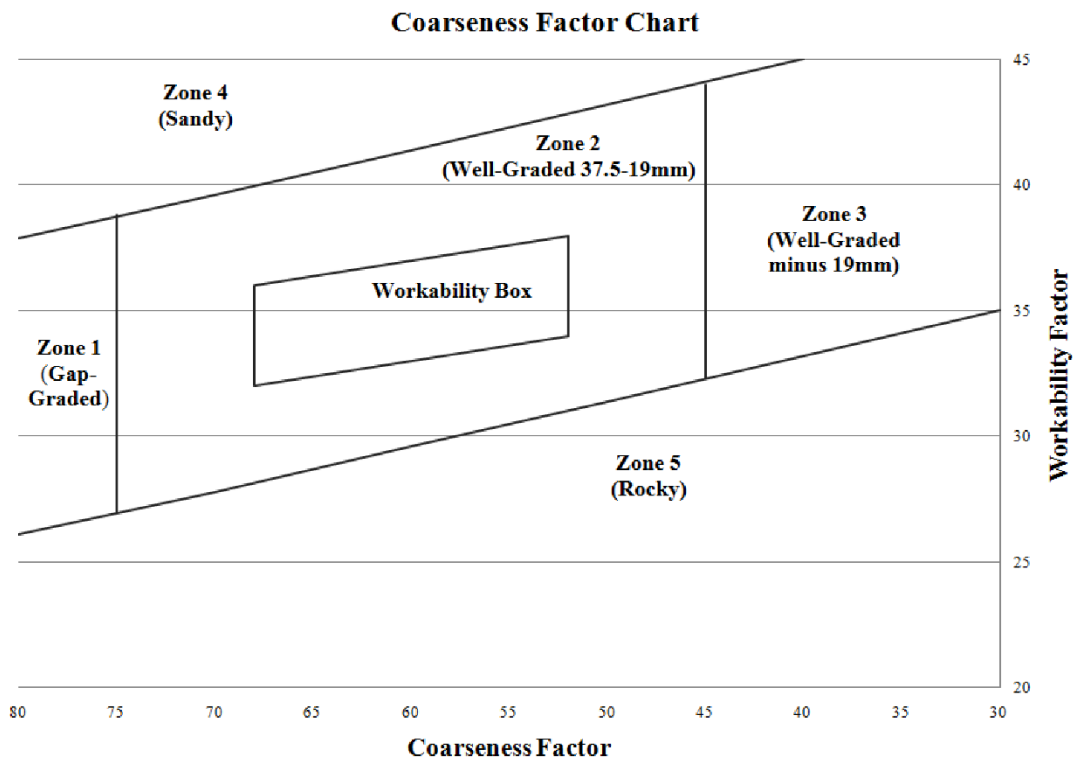


Figure 2.2 Graphique du facteur de grosseur de Shilstone

## 2.4. . Modèles théoriques de la compacité

Le béton est un matériau composite constitué de granulats collés par un liant. Un bon mélange de particules de tailles différentes entraînera moins de pores. Plus la compacité est élevée, plus la porosité ou le volume des pores est faible. Une porosité plus faible signifie que moins de pâte de ciment est nécessaire pour remplir les vides ou les pores. La demande en eau devrait également être inférieure. D'un point de vue écologique, ce sont des effets bénéfiques.

Du point de vue environnemental, une compacité supérieure est bénéfique. Ce serait aussi bénéfique pour les producteurs de béton, car le ciment est l'un des composants les plus coûteux. Il est également intéressant de réduire la quantité de ciment, car la chaleur d'hydratation et le retrait du séchage sont directement proportionnels à la quantité de ciment. Moins de ciment signifie moins de fissures.

L'optimisation du squelette granulaire minimise le volume des vides, ce qui conduit à réduire la quantité de pâte nécessaire pour remplir ces vides et à améliorer les propriétés mécaniques du béton (Esmailkhanian, B. *et al.*, 2017). Il existe deux approches pour optimiser le squelette granulaire : courbes d'optimisation et modèles de compacité de particules.

### 2.4.1. Courbes d'optimisation

Fuller et Thomson ont développé des courbes de granulométrie idéales pour des combinaisons de granulats basées sur des expériences et ont indiqué que ces courbes idéales pourraient être comparables à une parabole. Les calculs de formulations basés sur cette courbe sont encore utilisés. La courbe de Fuller est décrite selon l'Équation 2.8 avec  $q = 0,5$  (Talbot et Richart, 1923). Certains chercheurs ont essayé d'améliorer cette courbe, notamment les études réalisées par (Andreasen, 1930). Il a proposé l'utilisation d'un exposant compris entre 0,33 et 0,50 (Équation 2.9). Ce facteur d'ajustement devait être déterminé expérimentalement et pouvait donc différer en fonction des caractéristiques des particules. Pour les particules grossières angulaires, il serait préférable de prescrire la courbe idéale avec un nombre plus faible ou, en d'autres termes, davantage de particules fines devraient être ajoutées pour combler les vides entre les particules grossières (Kumar et Santhanam, 2003). La porosité est minimisée à mesure que l'exposant  $q$  est réduit (Andreasen, 1930).

$$P_{(d)} = \left[ \frac{d}{d_{max}} \right]^q \quad \text{Équation 2.8}$$

Où «  $P_{(d)}$  » est la fraction des solides totaux (granulat et ciment) plus fine que la taille «  $d$  » et «  $d_{max}$  » est la taille maximale des particules.

Un développement de la courbe de granulométrie parabolique tel que présenté dans l'Équation 2.9 a été présenté par (Bolomey, 1947). La valeur de la constante empirique «  $f$  » est choisie en fonction du degré de maniabilité requis. La valeur la plus élevée de cette constante correspondant à une maniabilité supérieure.

$$P_t = f + (1 - f) \left( \frac{d}{D} \right)^{0,5} \quad \text{Équation 2.9}$$

Basée sur des performances du béton, Dreux a recommandé une distribution idéale de la taille des particules (De Larrard, 1999). La Figure 2.3 montre une relation semi-

logarithmique : la valeur de « A » est choisie en fonction de la taille maximale des granulats, de la teneur en ciment, de la quantité de vibration, de la forme des particules et du module de finesse du sable.

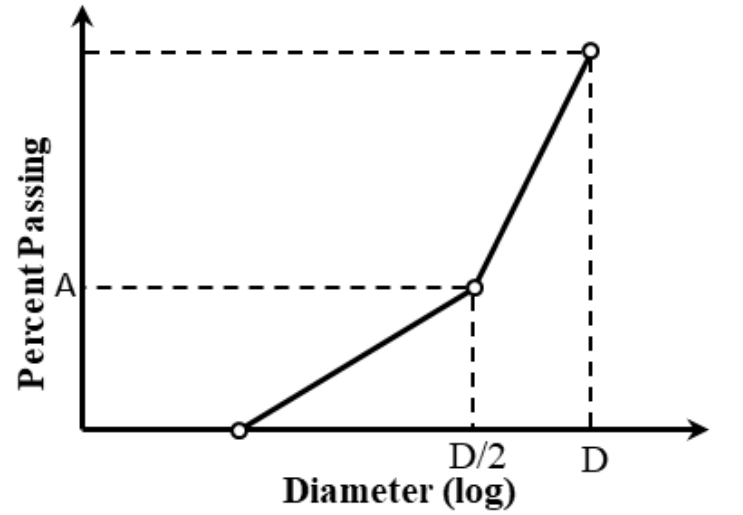


Figure 2.3 Courbe granulaire de référence selon Dreux

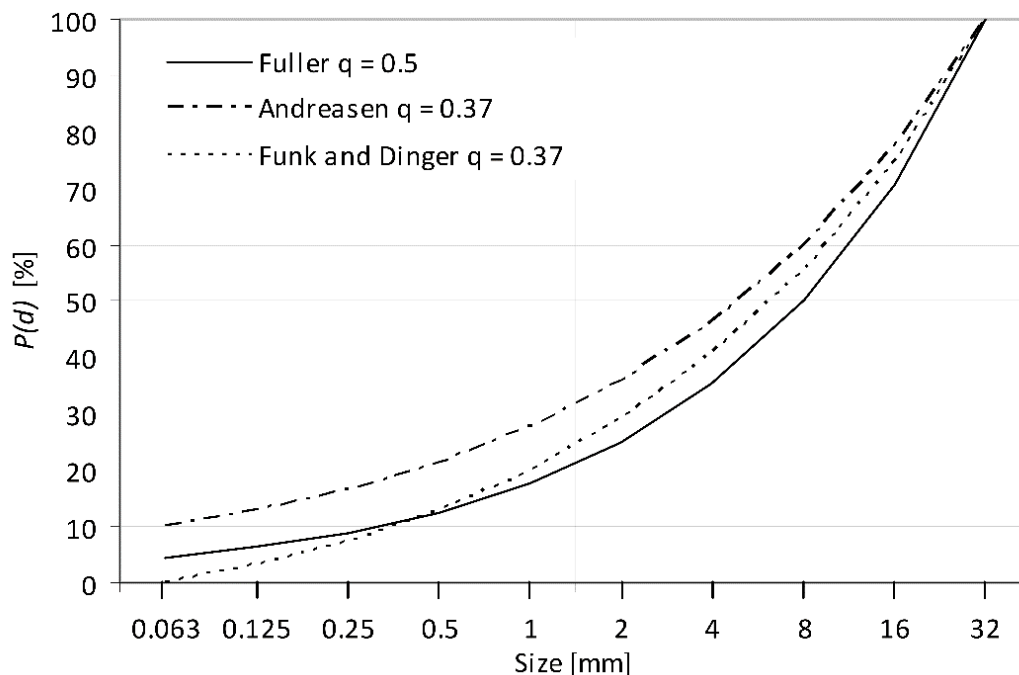
Funk et Dinger ont découvert que toute autre distribution de taille avait une taille inférieure à «  $d_{min}$  » (Funk et Dinger, 1994). Cette formule se retrouve à l'Équation 2.10 où la valeur de «  $q$  » proposée pour atteindre la compacité granulaire optimale est de 0,37.

$$P(d) = \frac{d^q - d_{min}^q}{d_{max}^q - d_{min}^q} \quad \text{Équation 2.10}$$

La courbe résultante est censée atteindre la compacité granulaire optimale en donnant les proportions optimales de tailles différentes combinées. Malheureusement, la forme des particules n'est pas tenue en compte dans cette méthode. La forme des particules contrôle grandement la compacité granulaire résultante, en particulier lorsque les particules utilisées ont plusieurs classes de taille et des caractéristiques de particules variables (Zheng *et al.*, 1990). Pour cette raison, Zheng a essayé de résoudre ce problème en déterminant la moyenne de toutes les valeurs «  $q$  » pour chaque classe de taille avec une forme de particule variable. Peronius et Sweeting ont présenté une équation permettant de calculer la porosité des mélanges, en fonction de la rondeur des particules et de l'écart par rapport à la courbe de Fuller (Peronius et Sweeting, 1985). D'autres chercheurs ont utilisé le modèle de Funk et Dinger pour optimiser leurs mélanges de béton en ajustant la valeur de «  $q$  » en fonction de



leurs résultats expérimentaux ou de la maniabilité requise (H. J.H. Brouwers et Radix, 2005; Garas et Kurtis, 2008; Hunger, 2010; Kumar et Santhanam, 2003; Lagerblad et Vogt, 2004).



*Figure 2.4 Courbes de granulométrie idéales selon Fuller, Andreasen, Funk et Dinger pour un diamètre de particule maximal de 32 mm et un diamètre de particule minimal de 63  $\mu\text{m}$  (Fennis 2010)*

#### 2.4.2. Modèles de compacité des particules

Dans cette méthode, la compacité granulaire totale est calculée à partir de modèles mathématiques. Ces modèles de compacité divergent de simple à complexe pour les combinaisons binaires sans interaction entre les particules et les mélanges polydispersés incorporés avec des interactions de particules. L'interaction entre les particules résulte de l'effet de desserrement et de l'effet de paroi. L'effet de desserrement se produit lorsque les gros granulats sont répandus et que les fines particules ne sont pas suffisamment petites pour remplir tous les vides entre les plus grosses particules. L'effet de paroi se produit lorsque les particules fines sont répandues et que le compactage de ces particules fines est perturbé par les limites des parois créées par les particules grossières. L'effet de desserrement et l'effet de paroi sont illustrés à la Figure 2.5.

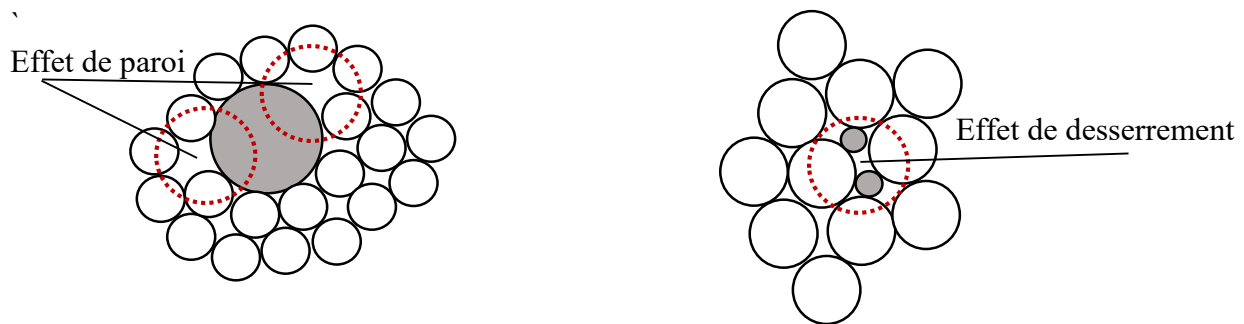


Figure 2.5 Effet de desserrement et l'effet de paroi.

La compacité granulaire des particules dans le béton écologique est importante, car une plus faible teneur en vides entre les granulats entraînera une réduction de la quantité de pâte de ciment et une plus faible teneur en vides des particules réduira la demande en eau. En ce qui concerne le béton, la compacité granulaire des granulats peut varier de 0,55 à 0,80 (Fennis, 2010). À l'état durci, la pâte de ciment remplit les espaces de la structure des granulats pour coller les composants du béton. Le remplissage des vides par de petites particules améliore la compacité granulaire et contribue considérablement à la friction inter-particulaire du mélange. Le mélange devient plus résistant et plus rigide, ce qui est bon pour les propriétés du béton à l'état durci, mais la maniabilité peut en souffrir. Par conséquent, à l'état frais, la pâte de ciment doit non seulement remplir les vides entre les particules, mais une quantité excessive de pâte de ciment est nécessaire pour lubrifier le mélange de béton et donner au mélange une capacité de travail suffisante. S'il n'y a pas de quantité excessive de pâte, les fillers ne feraient que combler les vides entre les grosses particules, diminuant ainsi l'espace disponible pour le passage et augmentant le frottement inter-particulaire, diminuant ainsi la maniabilité. Par conséquent, les producteurs de béton et les ingénieurs s'efforcent encore d'améliorer la compacité des particules et la distribution granulométrique du béton. La compacité des particules peut améliorer le retrait et le fluage du béton en fournissant une structure de granulat solide avec une compacité granulaire élevée et en réduisant la demande en eau. Par conséquent, une compacité granulaire accrue conduit à la conception de béton à haute résistance avec un rapport eau-ciment inférieur ou à un béton écologique avec un rapport eau-ciment constant, mais avec moins de ciment.

### 2.4.2.1. Modèle Furnas

Les équations de compacité granulaire ont d'abord été proposées par Furnas (Furnas, 1930). Ces équations sont valables pour deux groupes de particules sans interaction entre elles. Si les grosses particules dominent, les plus petites remplissent leurs vides ou bien si les petites particules dominent, les grosses sont incorporées dans une matrice de petites particules (Fennis, 2010). Un exemple pour la compacité granulaire maximale de Furnas (pour la fraction volumique des petites particules plus grande que le volume de fraction des grosses particules) est présenté à la Figure 2.6.

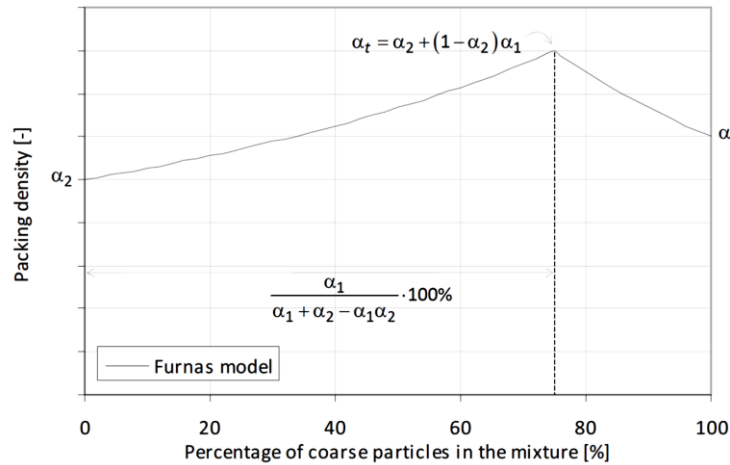


Figure 2.6 Profil de compacité de deux classes de particules ( $d_1 \gg d_2$ ) (Fennis, 2010).

### 2.4.2.2. Méthode Dewar

Les investigations expérimentales ont indiqué que le modèle théorique de Dewar permet une bonne approximation du degré de compacité pour les combinaisons de granulats binaires et ternaires (Dewar, 1999). Le rapport des vides «  $U$  » est lié à la porosité «  $\varepsilon$  » et à la compacité granulaire «  $\alpha$  », tels que présentés dans l'Équation 2.11, six mélanges peuvent être calculés pour deux classes de taille. Après cela, chaque mélange est lié à la troisième classe pour obtenir la combinaison de la compacité granulaire la plus élevée.

$$U = \frac{\varepsilon}{\alpha} = \frac{1-\alpha}{\alpha}$$

Équation 2.11

### 2.4.2.3. Modèle de compacité granulaire linéaire

Pour un mélange binaire, la compacité granulaire est toujours la plus petite des deux calculées par le modèle de Furnas. C'est à cause de la signification physique des expressions. Lorsque  $r_2 \gg r_1$  (beaucoup plus de petites particules), les plus grosses particules ne peuvent pas être complètement tassées, pour la simple raison que si elles le sont, il n'y aurait pas assez d'espace pour placer toutes les fines particules dans leurs vides. Inversement, lorsque  $r_1 \gg r_2$  (beaucoup plus de grosses particules), les plus petites particules ne peuvent pas être complètement tassées simplement parce qu'il n'y a pas assez de particules pour remplir complètement l'espace entre les grosses particules. Pour cette raison, la compacité granulaire est toujours le minimum de «  $\alpha_t$  » et la classe de taille avec le plus bas «  $\alpha_t$  » est appelée la classe de taille dominante.

Stovall, de Larrard et Buil ont montré que cette relation est également vraie pour les mélanges multicomposants (Stovall, de Larrard et Buil 1986). Un système complet est composé d'au moins une classe condensée, appelée classe de taille dominante «  $i$  ». La compacité granulaire est déterminée selon l'Équation 2.12. Dans lequel ( $i = 1$ ) désigne toujours la plus grande particule.

$$\alpha_t = \text{minimum} \left[ \frac{\alpha_i}{1 - (1 - \alpha_i) \sum_{j=1}^{i-1} r_j - \sum_{j=i+1}^n r_j} \right] \quad \text{Équation 2.12}$$

Ce modèle n'est valide que lorsque  $d_i \gg d_{i+1}$ . Si cette condition n'est pas remplie, la compacité granulaire du mélange binaire dépendra également des rapports de diamètre des classes de taille. La raison en est l'interaction entre les particules décrites par l'effet de paroi et l'effet de desserrement. Lorsque de petites particules perturbent la compacité granulaire de la classe de taille dominante plus grande «  $i$  », l'expansion locale de l'emballage des plus grosses particules due à l'introduction des plus petites est exprimée via la fonction «  $f(i, j)$  ».

L'inverse, lorsque les petites particules sont complètement tassées, la densité des petites particules dominantes sera plus basse près d'une grosse particule en raison de l'effet de paroi, comme exprimé avec l'aide de la compacité granulaire totale, Équation 2.13.

$$\alpha_t = \text{minimum} \left[ \frac{\alpha_i}{1 - (1 - \alpha_i) \sum_{j=1}^{i-1} g(j,i) r_j - \sum_{j=i+1}^n f(i,j) r_i} \right] \quad \text{Équation 2.13}$$

Le modèle de compacité linéaire peut être utilisé pour optimiser la courbe de granulométrie d'un mélange de béton. À la Figure 2.7, la courbe de granulométrie optimale est construite pour une distribution composée de quinze classes de taille, chacune ayant une compacité granulaire  $\alpha_i=0,6$ .

Sans interaction, le modèle de compacité linéaire est comparable à la courbe d'optimisation de Funk et Dinger pour  $q=0,44$ . En raison d'interaction, la courbe de granulométrie optimale change, de sorte que chaque mélange a sa propre composition optimale. Par exemple, lorsque le sable arrondi est combiné avec des agrégats angulaires grossiers, la distribution optimale de la taille des particules diffère de celle d'un mélange avec du sable provenant de roches concassées et d'agrégats grossiers arrondis. Pour déterminer cette composition optimale, un programme informatique tel que 4C-Packing (Glavind et Pedersen, 1999) peut être utilisé.

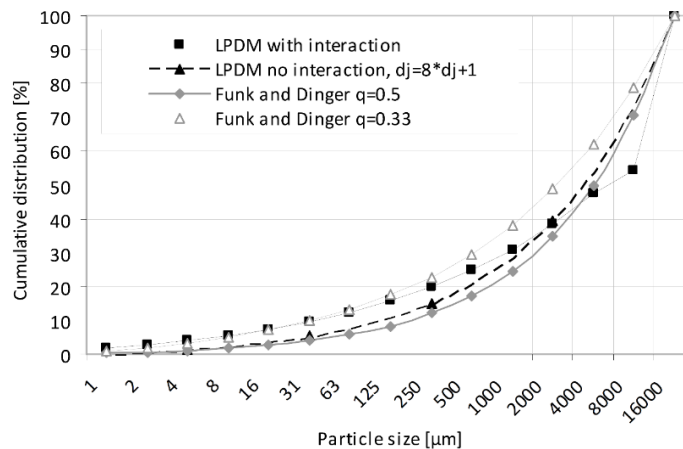


Figure 2.7 Distribution optimale de la taille des particules pour LPDM en relation avec la courbe d'optimisation de Funk et Dinger.  $\alpha_i=0,6$  et pour LPDM sans interaction  $d_j$  est 8 fois plus grande que  $d_{j+1}$  (Fennis, 2010)

\*LPDM : Le modèle de la compacité linéaire

#### 2.4.2.4. Modèle de compacité compressible

Le modèle de compacité compressible (De Larrard, 1999) comprend le compactage d'un mélange via la compacité virtuelle «  $\beta$  ». La compacité «  $\beta$  » est définie comme la masse volumique maximale potentielle d'un mélange si les particules ont été placées l'une après l'autre de manière à utiliser le minimum d'espace. Par exemple, pour un empilement régulier

constitué de sphères de même taille «  $\beta$  » est 0,74. Si les mêmes particules ont été combinées à partir d'une structure ordonnée au hasard, la compacité granulaire se situe dans la plage de 0,60 à 0,64. L'équation générale du modèle, qui représente la compacité granulaire virtuelle d'un mélange contenant «  $n$  » classes de taille dont la catégorie est «  $i$  » dominante, est exprimée par l'Équation 2.14.

$$\alpha_t = \min_{i=1}^n \left[ \frac{\alpha_i}{1 - (1 - \alpha_i) \sum_{j=1}^{i-1} a_{ij} \cdot \varphi_j - \sum_{j=i+1}^n b_{ij} \cdot \varphi_j} \right] \quad \text{Équation 2.14}$$

Pour une classe de particules de même taille «  $b_j$  » peut être déterminé par l'Équation 2.14 à partir de la compacité granulaire déterminée expérimentalement «  $\alpha_j$  ». Les coefficients «  $a_{ij}$  » et «  $b_{ij}$  » représentent l'effet de desserrement et l'effet de paroi. Dans le modèle de (De Larrard, 1999), les mélanges granulaires binaires ont été évalués avec le modèle de compacité compressible (CPM) pour déterminer les Équations 2.15, 2.16, et 2.17.

$$\alpha_j = \frac{b_j}{1 + \frac{1}{k}} \quad \text{Équation 2.15}$$

$$a_{ij} = \begin{cases} \sqrt{1 - \left(1 - \frac{d_j}{d_i}\right)^{1.02}}, & d_i > d_j \\ 0, & d_i \leq d_j \end{cases} \quad \text{Équation 2.16}$$

$$b_{ij} = \begin{cases} 1 - \left(1 - \frac{d_i}{d_j}\right)^{1.50}, & d_j > d_i \\ 0, & d_j \leq d_i \end{cases} \quad \text{Équation 2.17}$$

La compacité granulaire virtuelle «  $\beta$  » est supérieure à la compacité granulaire réelle, qui dépend de l'énergie de compactage appliquée. Pour déterminer la compacité granulaire réelle, un scalaire (c'est-à-dire l'indice de compactage  $K$ ) est introduit. Il est défini pour dépendre uniquement du compactage appliqué. Lorsque «  $K$  » tend vers l'infini, la compacité granulaire réelle «  $\alpha_t$  » tend vers la compacité granulaire virtuelle «  $\beta_t$  ». La compacité granulaire  $\alpha_t$  est déterminée indirectement à partir de l'Équation 2.18.

$$k = \sum_{i=1}^n k_i = \sum_{i=1}^n \frac{\frac{r_i}{\beta_i}}{\frac{1}{\alpha_t} - \frac{1}{\beta_{ti}}} \quad \text{Équation 2.18}$$

#### 2.4.2.5. Modèle de Fennis

Le modèle de Fennis (CIPM), développé par (Fennis, 2010), est une extension du CPM de (De Larrard, 1999) afin d'inclure les interactions dues aux forces de surface des particules très fines. Les paramètres du CIPM sont très similaires à ceux du CPM. Pour les particules plus fines que 125  $\mu\text{m}$ , les forces de surface peuvent dépasser les forces gravitationnelles qui provoquent l'agglomération des particules. Ce phénomène peut influencer le caractère aléatoire de la structure de la compacité, ce qui est généralement supposé pour la formulation mathématique analytique des modèles de compacité. Bien que ce modèle soit assez prometteur pour la prédiction de la compacité granulaire des matériaux en poudre, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour vérifier l'applicabilité des paramètres empiriques des équations aux matériaux et aux mélanges autres que ceux utilisés par (Fennis *et al.*, 2013). L'effet des superplastifiants (SP) est particulièrement important à étudier, car il influence le niveau de dispersion des particules fines dans une suspension, ce qui influe à son tour sur la compacité granulaire mesurée. Ce phénomène peut avoir une influence sur certains des coefficients ajustés expérimentalement dans le CIPM (Fennis, 2010).

### 2.5. . Conception de béton écologique

En tant que technologie avancée de génie civil, le béton autoplaçant (BAP) est capable de consolider et de remplir des formes sous son propre poids sans vibration (ACI committee 318, 2011; Khayat, 1998, 1999). Le BAP est très fluide, homogène et stable. En raison de ses performances élevées et de son excellente autoconsolidation, de nombreuses études ont été réalisées sur la composition du béton, la conception du mélange (Long *et al.*, 2014), la performance globale et les techniques de construction du BAP (Roussel *et al.*, 2010; Wallevik et Wallevik, 2011; Zhao *et al.*, 2015).

Le BAP a été une des plus grandes innovations que l'industrie de la construction ait connue comme résultat de recherches scientifiques développées au Japon. Ce type de béton a initialement été utilisé au Japon pour améliorer la qualité de la surface et la durabilité des structures provoquée par un appauvrissement de la qualité des constructions en béton à cause du manque d'ouvriers qualifiés. À partir de l'année 1990, le BAP a été utilisé pour la

confection industrielle des éléments préfabriqués possédant des teneurs élevées d'armatures et pour améliorer la productivité globale des ouvrages (Tanaka *et al.*, 1993).

En prenant en compte la capacité de déformabilité très élevée du BAP à l'état frais, il y a des avantages par rapport au béton conventionnel vibré (ACI 237R, 2007). On peut citer :

- L'élimination de la vibration mécanique et des risques de mauvaise qualité de finition lorsque le béton n'a pas été vibré adéquatement;
- Le coulage du BAP à n'importe quelle heure de la journée, sans créer de nuisance sonore dans le voisinage à cause de l'élimination de la vibration (Pierre-Claude, 2007);
- La réduction du coût de la main-d'œuvre, à cause de la réduction du personnel ouvrier chargé de la mise en place du béton et de la réduction des risques d'accident sur les chantiers en supprimant des postes de travail à risque (Ouchi *et al.*, 2003);
- L'amélioration de la productivité globale de l'ouvrage à cause de la réduction de la main-d'œuvre et des travaux de finition de surface, de la suppression des systèmes de vibration, de l'augmentation du taux de coulée en béton et de la durée de vie des coffrages;
- L'amélioration des performances mécaniques, esthétiques et de durabilité, pratiquement indépendante du savoir-faire du personnel ouvrier lors de la mise en place;
- La réduction de l'impact environnemental à cause de l'utilisation des ajouts cimentaires et de l'élimination du bruit occasionné par des équipements vibreurs;
- La réduction jusqu'à 10 % du coût global de construction grâce à l'utilisation du BAP (Sotomayor Cruz, 2012).

L'approche de conception initiale du BAP était basée sur l'utilisation d'une grande quantité de liants pour atteindre la fluidité requise (Okamura, 1988; Ozawa *et al.*, 1989). Dans son étude, Domone 2006 a rapporté que des mélanges typiques de BAP contiennent environ 500 kg/m<sup>3</sup> de liants (Domone, 2006). Cette énorme quantité de liant augmente les coûts de production, en particulier dans les projets et applications ne nécessitant pas de béton à haute résistance (Pelisser *et al.*, 2018). Bien que la plupart des composants du béton soient des matériaux écologiques, le CO<sub>2</sub> émis lors du processus de fabrication du ciment pose un problème environnemental (Esmaeilkhani, B. *et al.*, 2017; Proske *et al.*, 2016; Turner et Collins, 2013; Yang *et al.*, 2016). La production d'un BAP efficace à faible teneur en liant (que l'on peut appeler BAP-éco) est fortement recommandée pour réduire les coûts et la



pollution de l'environnement. BAP-éco doit répondre aux exigences d'autoconsolidation et maintenir le coût pour être un béton écologique (Esmailkhanian, B. *et al.*, 2017).

### **2.5.1. Béton d'Ecosmart Canada**

Le comité de pilotage Ecosmart soutient la recherche sur l'utilisation des fillers fins et des matériaux de remplacement du ciment. Sur la base de projets de démonstration, les émissions de CO<sub>2</sub> sont réduites en stimulant l'utilisation de grandes quantités de matériaux de remplacement du ciment. Bien que le projet vise à utiliser différents types de matériaux de remplacement du ciment tels que le métakaolin, les pouzzolanes naturelles, les cendres de riz, les fumées de silice ou les laitiers de haut fourneau, il se concentre principalement sur les cendres volantes. Les cendres volantes sont l'ajout cimentaire le plus répandu et le plus disponible au Canada. Par conséquent, il est très sûr de l'utiliser dans le béton. Avec un béton à haute teneur en cendres volantes (45 %), il est possible de produire un béton économique avec une teneur en ciment de seulement 165 kg/m<sup>3</sup> (Tableau 2.2).

L'utilisation de cendres volantes dans le béton réduit généralement la perméabilité, et donc la résistance aux chlorures et aux sulfates. De plus, la demande en eau est réduite grâce à l'amélioration de la plasticité et de la maniabilité du béton frais. Cependant, un faible rapport eau/liant est nécessaire pour garantir la durabilité et des durées de mûrissement supplémentaires peuvent également être nécessaires. La résistance aux cycles de gel-dégel et la carbonatation sont particulièrement sensibles à ces aspects. Le projet d'Ecosmart a contribué à augmenter le pourcentage moyen de cendres volantes dans le béton, qui est passé de 15 % en 1999 à 25 % en 2002 au Canada. Des projets de démonstration ont montré que le remplacement de 50 % du ciment par des cendres volantes est rentable en matière de coûts, d'exécution et de performances. Cependant, il a également été conclu qu'il restait encore des obstacles politiques, techniques et économiques (Bilodeau et Mohan Malhotra, 2000). Pour le béton, le temps de prise accru, le développement plus lent de la résistance, le mûrissement et les incertitudes concernant la résistance aux cycles de gel-dégel sont des obstacles. En outre, la qualité variable des cendres volantes, les coûts supplémentaires de transport et de stockage, la couleur des surfaces en béton et l'absence de normes risquent de résister à la

commercialisation du béton à haute teneur en cendres volantes (Bilodeau et Mohan Malhotra, 2000; Bouzoubaâ *et al.*, 2001; Joshi et Lohtia, 1998).

Tableau 2.2 Compositions de mélanges utilisées dans le projet Ecosmart (Fennis, 2010).

Composition		Fly ash		
		25%	35%	45%
Water	[kg/m <sup>3</sup> ]	164	158	158
Cement	[kg/m <sup>3</sup> ]	225	195	165
Fly ash	[kg/m <sup>3</sup> ]	75	105	135
20-5 mm coarse aggregate	[kg/m <sup>3</sup> ]	980	985	987
Sand	[kg/m <sup>3</sup> ]	1013	1010	1000
Polyheed 997	[mL/100kg powder]	650	650	550
<i>wpr</i>	[-]	0.547	0.527	0.527
Density	[kg/m <sup>3</sup> ]	2457	2453	2444
Slump	[mm]	80	80	70
Air content	[%]	2	2	1.8
Measured density	[kg/m <sup>3</sup> ]	2485	2504	2496
Compressive strength*				
3 – day	[N/mm <sup>2</sup> ]	22.2	18.8	13.1
7 – day	[N/mm <sup>2</sup> ]	29	26.9	24.7
14 – day	[N/mm <sup>2</sup> ]	36.4	32.8	32.1
28 – day	[N/mm <sup>2</sup> ]	43.4	38.7	36.4
56 – day	[N/mm <sup>2</sup> ]	45.7	44.9	44.2

\* average of two 150 mm diameter test cylinders

### 2.5.2. Critères de conception de BAP-éco selon Mueller, 2012

Des BAP-éco avec une teneur en poudre égale ou inférieure à 315 kg/m<sup>3</sup> ont été réalisés avec succès par (Mueller, 2012). Les effets de la composition de la poudre et de différentes combinaisons de mélanges sur différentes propriétés des mélanges BAP-éco ont été examinés. Toutefois, en raison de la vaste gamme des matériaux étudiés, aucune partie de cette étude n'a formulé de recommandations générales sur le choix de la composition de la poudre et des types d'adjuvants. Il a été démontré que le volume du mortier, c'est-à-dire le volume de pâte, d'air et de particules de sable et de gros granulats d'une taille inférieure à 125 µm, était le principal paramètre à prendre en compte pour garantir un blocage minimal tout en produisant des propriétés rhéologiques autoconsolidantes de bonnes capacités de

passage et de remplissage et une stabilité statique et dynamique satisfaisante. Ainsi, le volume de la pâte n'est pas le facteur important à prendre en compte lors de l'évaluation de la qualité du BAP. À cet égard, la fluidité ne devrait être augmentée qu'avec un mortier stable, c'est-à-dire que la fluidité du mélange ne devrait pas être obtenue au moyen d'une sursaturation avec un mélange dispersant. En général, plus la viscosité plastique est faible, plus le volume du mortier doit être bas pour assurer une stabilité adéquate. De même, si une faible viscosité est recherchée au moyen d'un entraînement en E/L et/ou à l'air élevé, ou en fonction de caractéristiques de granulats, il convient de sélectionner un volume de mortier inférieur. La teneur minimale en mortier pour une distribution optimisée de la taille des particules était d'environ  $360 \pm 10 \text{ l/m}^3$ . Pour obtenir ce volume de mortier, deux stratégies ont été proposées : l'approche d'Air Matrix (AMA) et l'approche de Solid Matrix (SMA).

Dans la première approche, l'entraînement d'air et les particules fines provenant des agrégats (particules inférieures à  $125 \mu\text{m}$ ) étaient la principale source d'augmentation du volume du mortier. Dans la SMA, les matériaux en poudre qui ne sont généralement pas considérés comme liants (tels que les pouzzolanes naturelles et le filler de basalte), plus les fines du granulat ont fourni le volume de mortier nécessaire. Dans ce cas, la teneur totale en poudre pourrait dépasser la limite de  $315 \text{ kg/m}^3$ . Pour les deux approches, l'utilisation d'un stabilisant a été fortement recommandée. La résistance à la compression des mélanges étudiés était assez variable en fonction du liant utilisé et du rapport E/L. Les valeurs de résistance se situaient dans la gamme C16/25, C40/50 (certains mélanges de l'AMA) et C50/60 (certains mélanges de la SMA). Étant donné que les propriétés du BAP sont régies par les interactions mortier-granulat, les études prenant en compte uniquement la fraction de mortier peuvent ne pas aboutir à une conception optimisée du mélange du béton en raison d'une prise en compte insuffisante des effets du granulat grossier. Il a été démontré que la distribution granulométrique optimale pour les mélanges BAP-éco développés était mieux décrite par la courbe de Funk et Dinger (Funk et Dinger, 1994) avec un module de distribution ( $q$ ) de 0,20. Cette distribution granulométrique incluait également la fraction des poudres. Il a été avancé que l'utilisation de cette distribution granulométrique entraînait un effet de réseau de particules (PLE) plus élevé pour la stabilisation, ce qui permettait d'obtenir un mortier peu visqueux dans laquelle la teneur en eau et en air pouvait être augmentée par

rapport à la proportion de mortier dans un BAP conventionnel. Il a été démontré que l'utilisation de la courbe idéale de Fuller & Thompson (Fuller et Thomson 1907) au lieu du modèle de Funke et Dinger (Funk et Dinger, 1994) entraînait une augmentation de la demande en poudre, principalement pour atteindre la viscosité plastique nécessaire pour éviter la ségrégation.

Le travail présenté par Mueller montre qu'il est important de déterminer le volume du mortier le plus bas convenant à un granulat donné, en tenant compte de la forme, de la texture et de la distribution granulométrique lors de la conception d'un BAP à faible teneur en poudre (BAP-éco) (Mueller, 2012). À cet égard, il est essentiel de quantifier la compacité granulaire du sable et des proportions de granulat grossiers pour les matériaux devant être utilisés dans certaines applications. Puisque le module de distribution « q » est lié à la compacité granulaire des particules (H. J H Brouwers et Radix, 2005), la compacité granulaire et maximale peut devenir la base pour déterminer « q ». Cependant, comme il a été mentionné précédemment, des valeurs trop petites ou trop grandes de « q » peuvent donner des squelettes granulaires qui ne conviennent pas au BAP. Ainsi, il convient de prendre en compte d'autres critères tels que la viscosité plastique extrêmement élevée ou le risque de blocage et de ségrégation. Un autre aspect important des résultats obtenus par (Mueller, 2012) est que la teneur en eau de BAP-éco est limitée par le volume de mortier minimal requis et par la ségrégation, ce qui conduit à une gamme étroite comprise entre 180 et 200 kg/m<sup>3</sup>, en fonction des compositions des autres mélanges. Enfin, il ressort clairement de ce projet que le choix de la composition de la poudre ainsi que des dosages de SP et de stabilisant n'est pas facile à faire. Un large éventail de besoins dans les deux états frais et durci doit être pris en considération.

### **2.5.3. Méthode de conception du mélange développée par (S. Fennis 2010) pour BAP-éco**

La procédure de conception de mélange développée par Fennis est basée sur l'optimisation de la fraction volumique de toutes les particules solides afin d'obtenir la compacité granulaire (Fennis 2010). Il soutient que la résistance à la compression doit être un paramètre de contrôle dans la procédure de conception. Étant donné que la compacité granulaire influe sur

la demande en eau et sur la résistance du béton, une méthode de conception cyclique en trois étapes est proposée pour obtenir un mélange écologique. Il convient de garder à l'esprit que, à ce stade, la méthode de conception n'est valable que pour les mélanges comprenant un superplastifiant de type polycarboxylate jusqu'à ce que les équations du modèle du CIPM pour les autres types de SP soient approfondies. Un mélange existant (CVC, BAP, etc.) est utilisé dans la première étape pour trouver un mélange avec la compacité optimale de particules. Le CIPM produit à cette étape une composition de mélange avec la compacité granulaire correspondante, «  $\alpha_t$  ». Dans l'étape suivante, la demande en eau du mélange est déterminée. Afin de prédire la demande en eau d'un mélange écologique à partir de la compacité granulaire du squelette granulaire, deux théories différentes sont examinées (Fennis 2010) : la théorie de la couche de pâte en excès et la théorie de la couche d'eau en excès. La première a été développée à l'origine pour aider à la conception de mélanges de BAP et s'est avérée utile pour certains chercheurs (Grunewald 2004; Li and Kwan 2013; Reinhardt and Wüstholtz 2006).

Les mélanges de béton écologiques ont été conçus avec des cendres volantes, de la poudre de quartz et des cendres résiduelles d'incinérateur, permettant ainsi d'économiser jusqu'à 57 % de ciment. D'autres fillers ont été testés, mais ne pouvaient pas être utilisés dans du béton écologique, car ils n'étaient pas en mesure d'augmenter la compacité granulaire. Les mélanges ont été testés sur la résistance à la compression, la résistance à la traction, le module d'élasticité, le retrait et le fluage. De bonnes propriétés des matériaux ont été obtenues malgré les faibles teneurs en ciment et les rapports eau/ciment élevés. Dans la conception du béton basée sur les performances, il est important de prendre en compte la composition minéralogique des liants. Pour la plupart des applications, la résistance peut être utilisée comme paramètre de conception principal du béton écologique. Le rapport entre la résistance à la compression moyenne et la résistance à la rupture par traction et le rapport entre la résistance à la compression et le module d'élasticité pour les mélanges écologiques correspondent à celles du béton normal.

#### 2.5.4. Béton vert (Danemark)

Le projet de béton vert, mené par le centre de recherche sur le béton de l'Institut technologique danois, visait à réduire l'impact du béton sur l'environnement et à mettre au point une solution technique permettant de mettre le béton vert sur le marché de la construction. Le béton a été défini comme étant vert lorsque le processus de production et/ou la composition du mélange entraînait une réduction d'au moins 30 % des émissions de CO<sub>2</sub> ou lorsque des produits résiduels étaient utilisés pour remplacer le ciment ou les granulats. Quatorze mélanges verts ont été testés dans le cadre d'un programme de recherche approfondi sur la maniabilité, les modifications de la maniabilité après 30 minutes, la teneur en air, le développement de la résistance à la compression, le module d'élasticité, le développement de la chaleur, l'homogénéité, le ressuage, le temps de prise, la densité et la pompabilité. Des mélanges prometteurs ont été testés concernant la perte de maniabilité, la sensibilité au compactage, le temps de mûrissement, la résistance à la rupture par traction, le retrait, le fluage, la carbonatation, la résistance aux cycles de gel-dégel, la résistance au feu, le transport de l'humidité, l'ancrage des barres d'armature, la résistance structurelle à la flexion. Les recherches sur les propriétés rhéologiques du béton vert ont montré que certains mélanges présentaient une perte d'ouvrabilité plus rapide, étaient plus collants ou exigeaient un temps de repos plus long avant que la finition ne puisse commencer que les mélanges de référence. Les propriétés rhéologiques devraient s'améliorer avec l'optimisation du mélange. Les propriétés mécaniques du béton vert ne diffèrent pas de manière significative des propriétés mécaniques des mélanges de référence. Le mélange P2 du Tableau 2.3 atteint une résistance à 28 jours de 26 N/mm<sup>2</sup> avec seulement 90 kg/m<sup>3</sup> de ciment Portland et le mélange A1 (Tableau 2.4) atteint une résistance à 28 jours de 58 N/mm<sup>2</sup> avec 189 kg/m<sup>3</sup> de ciment Portland. Ces quantités de ciment sont considérablement inférieures à celles prescrites par la réglementation danoise; cependant, la fumée de silice dans ces mélanges contribue également à la résistance et à la durabilité. De plus, les tests de durabilité effectués sur les mélanges A1 à A6 (Tableau 2.4) ont montré que seuls les mélanges A1 et A6 ne satisfont pas aux exigences des normes danoises en ce qui concerne respectivement la résistance au gel-dégel et la pénétration de chlorures. (Fennis, 2010; Glavind, M. and Munch-Petersen, 2002).

Tableau 2.3 Compositions des mélanges de béton vert, Danemark (Fennis, 2010; Glavind, M. and Munch-Petersen, 2002).

	Mixtures					
	PR	P2	P3	P5	P6	P7
Composition	Reference	50% FA + 10% KD	17% SSIA	Concrete Slurry	100% stone dust	30% FA biofuels
Cement [kg/m <sup>3</sup> ]	143	90	137	141	267	191
FA [kg/m <sup>3</sup> ]	51	128	15	52	-	-
SF [kg/m <sup>3</sup> ]	10	14	10	10	-	-
SPT [kg/m <sup>3</sup> ]	-	1.1	3.2	-	1.8	1.9
Equiv. w/c [-]	0.73	0.66	0.78	0.77	0.72	0.69
Compr. strength						
28 – day [N/mm <sup>2</sup> ]	-	26	21	23	29	28
56 – day [N/mm <sup>2</sup> ]	-	34	31	27	33	32
56-day [% of ref.]	-	100	93	80	97	94

SSIA: Sewage sludge incineration ash, FA: Fly ash, SF: Silica fume, KD: Kiln dust,  
SPT: Superplasticizer, CREP: Cement with reduced environmental impact

Tableau 2.4 Compositions des mélanges de béton vert, Denmark (Fennis, 2010; Glavind, M. and Munch-Petersen, 2002).

	Mixtures					
	AR	A0	A1	A3	A5	A6
Composition	Reference	CREP	40% FA + CREP	10% SSIA + CREP	Concrete Slurry	50% stone dust
Cement [kg/m <sup>3</sup> ]	288	287	189	227	398	397
FA [kg/m <sup>3</sup> ]	34	32	137	-	-	-
SF [kg/m <sup>3</sup> ]	17	17	18	17	-	-
SPT [kg/m <sup>3</sup> ]	-	-	3.4	3.2	2.4	6.8
Equiv. w/c [-]	0.45	0.47	0.46	0.45	0.38	0.37
Compr. strength						
28 – day [N/mm <sup>2</sup> ]	-	51	58	58	64	62
56 – day [N/mm <sup>2</sup> ]	-	58	61	68	68	63
56-day [% of ref.]	-	112	117	130	130	121

SSIA: Sewage sludge incineration ash, FA: Fly ash, SF: Silica fume, KD: Kiln dust,  
SPT: Superplasticizer, CREP: Cement with reduced environmental impact

### **2.5.5. Méthode de conception du BAP-éco développée par Esmaeilkhanian (Esmaeilkhanian 2016)**

Esmaeilkhanian a présenté un protocole de conception de mélange pour produire des BAP-éco (Esmaeilkhanian, 2016). Il a commencé par optimiser la teneur en poudre et en eau. Le volume maximal de poudre (matériau solide inférieure à 125  $\mu\text{m}$ , sauf pour les particules de sable) est limité à 10 % du volume total de béton (100  $\text{l/m}^3$ ), conformément à la définition de BAP-éco de (Mueller, 2012; Wallevik *et al.*, 2009). Ce volume correspond à 315  $\text{kg/m}^3$  pour un béton à base de ciment Portland. Compte tenu du volume de poudre maximal de 10 % et en fixant le volume de pâte minimal à 30 % du volume total de béton (Domone, 2006), la teneur minimale en eau des mélanges sans-air-entraîné et à air-entraîné est respectivement égale à 180  $\text{kg/m}^3$  et 150  $\text{kg/m}^3$ .

Les proportions volumétriques de sable et de chaque calibre de granulat grossier sont calculées à l'aide d'un processus d'optimisation simple similaire à celui proposé par (Hüsken et Brouwers, 2008). Un tel algorithme nécessite une connaissance de la granulométrie et de la densité du sable et des granulats grossiers. Les fractions volumiques de sable et de gros granulats sont calculées de manière à minimiser l'écart entre la distribution granulométrique réelle de la combinaison de sable et de gros granulats et une courbe de granulométrie idéale correspondant au modèle de Funk et Dinger (Funk et Dinger, 1994). Le paramètre « q » est choisi en fonction des propriétés des matériaux utilisés, comme sera expliqué par la suite. Tout d'abord, un diagramme de la compacité granulaire et de la fraction volumique globale grossière en fonction de « q » est établi. Pour ce faire, la distribution granulométrique des matériaux est optimisée pour chaque valeur de « q », ce qui conduit à la fraction volumique de chaque composant (sable et granulats grossiers). Connaissant la proportion de chaque matériau et le volume total de sable et de granulats grossiers, la compacité granulaire de la combinaison et le volume total de granulats grossiers peuvent être calculés. Un exemple de ce schéma est présenté à la Figure 2.8.



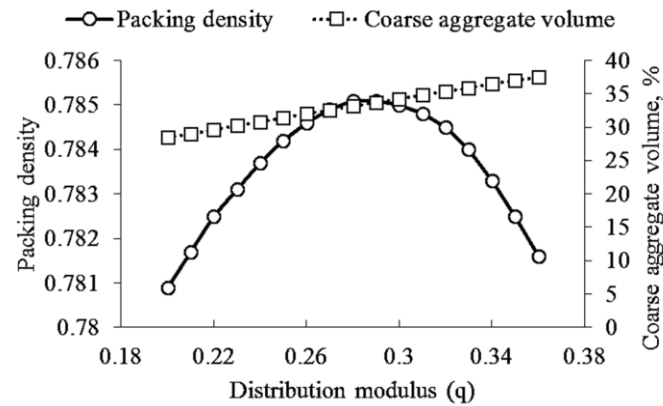


Figure 2.8 Relation entre la compacité granulaire, le volume de granulats grossiers et le module de distribution « q » (Esmaeilkhani, 2016)

### 2.5.6. Particules ultrafines dans le béton

Lagerblad et Vogt ont étudié le rôle qu'avait l'ajout de les particules ultrafines dans le béton ( $<10 \mu\text{m}$ ) (Lagerblad et Vogt, 2004). Grâce à l'efficacité des superplastifiants, il est possible d'inclure de grandes quantités de ces particules fines dans le béton et d'augmenter la résistance. Les particules ultrafines sont présentées avec un facteur d'efficacité de 1, ce qui signifie que le béton ne perd pas de sa résistance lorsque le ciment est remplacé (kg/kg) par des particules ultrafines. Étant donné que différents minéraux, tels que la fumée de silice, le quartz, la wollastonite et la roche syénite néphéline, influencent les propriétés d'hydratation, la structure de la pâte, le retrait et la résistance. L'incorporation de particules ultrafines accélère l'hydratation du ciment. Les particules ultrafines deviennent une partie intégrante de la pâte de ciment hydratée et améliorent l'homogénéité de la zone interfaciale. Un système de pores plus fins est mesuré par des tests d'intrusion de mercure.

Le Tableau 2.5 montre que le mélange LCC6 avec seulement 150 kg de ciment par  $\text{m}^3$  et sans fumée de silice atteint une résistance à 28 jours de  $60 \text{ N/mm}^2$ . Le rapport eau/ciment est de 0,76, ce qui indique que la relation traditionnelle entre le rapport eau/ciment et la résistance n'est plus valide. Avec les mélanges optimisés, il est possible de remplacer plus de 40 % du ciment et d'obtenir une résistance similaire. Le meilleur effet est obtenu lorsque

le ciment est remplacé, mais que le rapport eau/ciment est maintenu constant (Lagerblad et Vogt, 2004; Moosberg-Bustnes *et al.*, 2004; Vogt, 2010; Westerholm *et al.*, 2008).

*Tableau 2.5 Résistance à la compression de 28 jours des mélanges de béton à faible teneur en ciment, y compris les particules ultrafines. SF : fumée de silice, SP : superplastifiant PCE. (Lagerblad et Vogt, 2004)*

Mixture	Filler type [kg/m <sup>3</sup> ]	Cement [kg/m <sup>3</sup> ]	Water [kg/m <sup>3</sup> ]	Filler [kg/m <sup>3</sup> ]	SF [kg/m <sup>3</sup> ]	Aggregate [kg/m <sup>3</sup> ]	SP [kg/m <sup>3</sup> ]	<i>Wcr</i> [-]	<i>Wpr</i> [-]	Strength [N/mm <sup>2</sup> ]
LCC1	M300+M6000	150	114	200	30	2009	5	0.76	0.3	70
LCC2	Quartz slurry	150	114	200	30	2010	5	0.76	0.3	60
LCC3	Quartz slurry	150	118	200	45	2010	7.8	0.79	0.3	68
LCC4	Quartz slurry	100	126	300	20	1855	4.2	1.26	0.3	38
LCC5	M300+M6000	60	150	350	60	1679	12.5	2.5	0.32	40
LCC6	M300+M6000	150	112	230	-	1976	5	0.76	0.29	60
LCC7	Quartz slurry	315	140	400	35	1576	9	0.44	0.25	102

On peut conclure que le modèle Funk-Dinger (Funk et Dinger, 1994) a été utilisé dans différentes études pour optimiser le squelette granulaire du BAP. Il y a quelques valeurs recommandées du module de distribution (*q*) de ce modèle dans la littérature pour atteindre les caractéristiques de maniabilité de BAP appropriées. (Hunger, 2010) a proposé des valeurs *q* comprises entre 0,21 et 0,25 pour la distribution granulométrique de particules solides entières pour une teneur en poudre normale. (Mueller, 2012) a proposé une valeur *q* de 0,2 pour l'application de BAP-éco. (Esmaeilkhani, B. *et al.*, 2017) ont montré que l'augmentation de la valeur *q* peut augmenter continuellement la teneur en agrégats grossiers tandis que la compacité granulaire atteint sa valeur maximale à un volume de granulats grossiers optimal. D'autre part, les mélanges de béton fabriqués avec un squelette granulaire de granulométrie plus fine (c'est-à-dire des valeurs *q* plus petites) présentent une stabilité plus élevée en raison d'un niveau plus élevé d'effets de réseau de particules. (Esmaeilkhani *et al.*, 2017) ont recommandé une valeur *q* optimale de 0,23 pour obtenir une compacité granulaire élevée, un effet de réseau et une capacité de passage de BAP-éco.

## CHAPITRE 3 PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS DU PROJET DE RECHERCHE

### 3.1. Problématique

Les bétons fluides, tels que le BAP, sont de plus en plus utilisés depuis 1986 pour faciliter les opérations de construction. Ces matériaux sont conçus non seulement pour remplir rapidement les coffrages sans vibration afin de faciliter les opérations de mise en place, mais aussi pour assurer une bonne stabilité et des performances mécaniques adéquates. Plusieurs approches ont été utilisées pour développer les BAP. Une approche pour obtenir les propriétés d'auto-consolidation consiste à augmenter la quantité de matériaux fins afin d'améliorer la distribution du squelette granulaire et d'augmenter la cohésion du béton. Cependant, la distribution des granulats grossiers due à la ségrégation peut conduire à des propriétés hétérogènes du matériau durci avec des impacts directs sur les propriétés architecturales (mauvaise qualité de surface), les propriétés mécaniques et la durabilité.

Comme il a été déjà mentionné dans la synthèse bibliographique, d'un point de vue économique et environnemental, la production d'un BAP écologique (BAP-éco) est une alternative prometteuse qui est de plus en plus en vue. Le développement des BAP-éco repose essentiellement sur la combinaison des avantages du BAP (fluidité, homogénéité et stabilité) tout en utilisant une teneur en liant plus faible que celle d'un BAP normal. Du point de vue rhéologique, il est, en effet, plus facile de produire du BAP riche en poudre stable que du BAP maigre, comme dans le cas du BAP-éco, car la réalisation des trois critères essentiels d'auto-consolidation, à savoir la capacité de passage, la capacité de remplissage et la stabilité, sont principalement liées à une teneur plus élevée en poudre. Le volume de pâte est plus fluide pour un BAP-éco par rapport à un BAP normal en raison d'un rapport Eau/Liant (E/L) plus élevé. Une fluidité élevée de la pâte est également nécessaire pour assurer la déformabilité requise de BAP-éco, ce qui peut aussi compromettre la fluidité d'un

BAP-éco. En plus de la faible déformabilité, le BAP à faible teneur en poudre est plus susceptible à la ségrégation et au ressuage (Esmailkhanian, B. *et al.*, 2017).

L'optimisation de la proportion volumétrique de sable et de gros granulats a été réalisée sur la base de la courbe d'optimisation. Dans cette méthode, le choix du paramètre « q » est essentiel au succès de la formulation de BAP-éco. En raison du faible volume de pâte dans le cas de BAP-éco, il est plus difficile d'obtenir la fluidité requise. De plus, le BAP-éco est plus exposé au blocage. Par conséquent, la compacité granulaire du squelette granulaire devrait être optimale pour améliorer la fluidité, tandis que le volume total des granulats grossiers devrait rester relativement faible pour réduire le risque de blocage. Certaines recommandations sur la valeur de « q » peuvent être trouvées dans la littérature (Esmailkhanian, 2016; Hunger, 2010; Mueller, 2012), il n'existe pas de méthode systématique pour déterminer la valeur appropriée de ce paramètre pour une combinaison de matériaux donnée.

L'approche adaptée dans cette étude pour produire un BAP-éco est essentiellement basée sur la réduction du volume de pâte un liant ternaire constitué de 5% de fumée silice, 25% de cendres volantes et 70% d'un ciment GU. Les propriétés des granulats, telles que la distribution granulométrique, la forme, la texture, la rugosité et l'angularité des particules, sont étudiées, car ces propriétés ont une influence importante sur l'ouvrabilité et les résistances mécaniques du béton.

### **3.2. Objectifs de l'étude**

La réalisation de cette étude peut mener au développement de béton autoplaçant (BAP) et de béton semi-autoplaçant (BSAP) à teneur en pâte optimale. Pour réduire l'impact environnemental du béton et répondre aux exigences de fluidité, il convient de concevoir des compositions optimales de BAP-éco. L'influence des caractéristiques morphologiques sur les propriétés rhéologiques (maniabilité et stabilité) du béton fluide est encore mal connue. L'optimisation du squelette granulaire permet non seulement de réduire le volume de pâte, d'eau et d'adjuvants, mais peut également améliorer l'écoulement et les propriétés

mécaniques du béton. L'une des méthodes largement utilisées dans l'optimisation du squelette granulaire est la courbe granulométrique idéale.

L'objectif principal de cette étude est de développer des BAP et BSAP à rhéologie adaptée et à teneur en pâte optimale. De plus, caractériser les propriétés du squelette granulaire (taille, forme et texture de la surface) et à analyser l'effet de la variation de la proportion de sable sur la compacité granulaire des granulats. Plus spécifiquement, les objectifs spécifiques de cette étude sont :

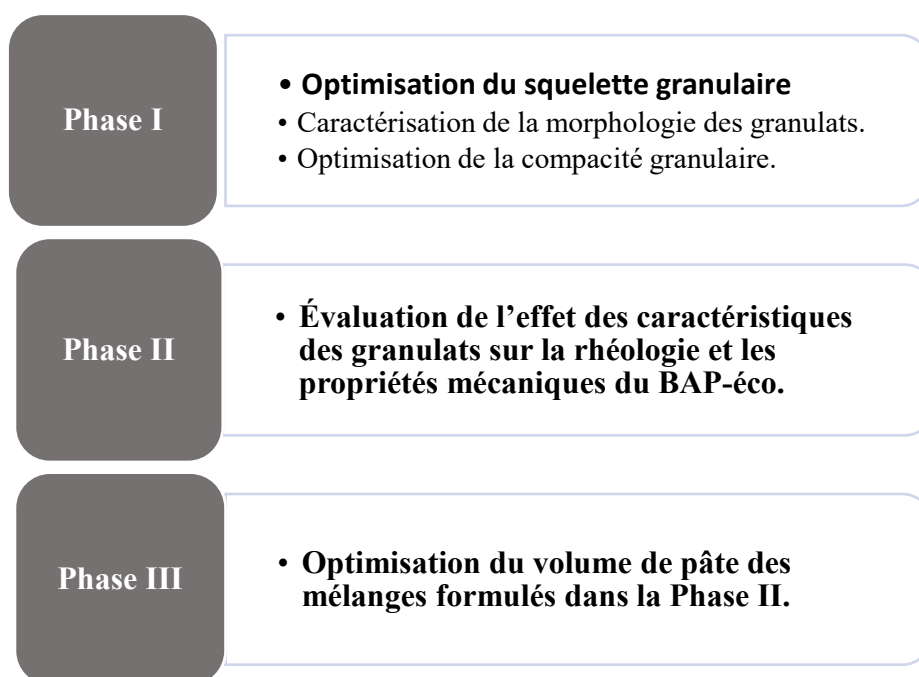
- ✓ Évaluer l'effet des caractéristiques de granulats et des proportions de mélanges sur la rhéologie et sa variation, la performance à l'écoulement ainsi que les propriétés mécaniques des BAP-éco et BSAP-éco.
- ✓ Identifier et optimiser les caractéristiques des granulats pour formuler les BAP-éco à rhéologie adaptée. Ceci peut être exploité pour faciliter la sélection des granulats pour la formulation des BAP-éco.
  - ✓ Déterminer l'influence de la morphologie des particules et de la distribution granulaire des granulats sur la rhéologie et les performances mécaniques des BAP-éco à rhéologie adaptée. Il s'agit également de développer une méthodologie pour faciliter le choix des granulats.
  - ✓ Développer et valider la performance des BAP-éco formulé avec des teneurs en pâte et des compacité granulaires optimales.



## CHAPITRE 4 PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

### 4.1. Plan expérimental

Les travaux de recherche sont déroulés en trois phases principales afin de répondre aux objectifs mentionnés précédemment. La méthodologie adoptée est décrite dans ce chapitre. La section 4.2 présente la première phase de ce travail, qui porte sur l'optimisation du squelette granulaire. La deuxième phase présentée à la section 4.3 se concentre sur l'évaluation de l'effet des caractéristiques des granulats sur la rhéologie et les propriétés mécaniques du BAP-éco. La section 4.4 décrit la phase finale de la mémoire qui consiste à optimiser le volume de pâte correspondant aux mélanges formulés dans la Phase II. La Fig. 4.1 présente un aperçu général du programme de cette étude.



### 4.2. Phase I : Optimisation du squelette granulaire

Les activités de cette phase sont consacrées au choix et à la caractérisation des granulats. Il s'agit de calculer la compacité granulaire théorique et expérimentale. Les activités de cette phase sont réalisées en deux étapes :

#### **4.2.1. Phase I - Étape 1 : Caractérisation de la morphologie des granulats**

Cette phase consiste à optimiser le squelette granulaire conformément au principe proposé par (Funk et Dinger, 1994) (Éq. 4.1). Cinq différentes valeurs de  $q$  correspondant à 0,400, 0,425, 0,450, 0,475 et 0,500 sont considérées. De plus, quatre différents rapports de sable/volume total des granulats de 45%, 50%, 55% et 60% sont étudiés. Un total de 20 différents mélanges sont étudiés. Dans cette étape, les caractéristiques morphologiques des granulats, notamment la forme, la texture, l'angularité et la rugosité sont déterminées et leurs effets sur la capacité à l'écoulement et les performances mécaniques sont évaluées (Phase II). Ces caractéristiques sont évaluées à l'aide d'un scanner 3D pour les gros granulats, d'un microscope électronique pour les granulats fins et les poudres. Les résultats de ces évaluations sont analysés à l'aide d'un code de traitement d'image (Image J).

#### **4.2.2. Phase I - Étape 2 : Optimisation de la compacité granulaire**

Une fois les formulations obtenues, la compacité granulaire réelle de ces mélanges a été déterminée en utilisant le compacteur à cisaillement giratoire (ICT-100R). L'essai est effectué sous une pression minimale de 20 kPa et 150 cycles. La masse pour tous les essais correspond à un volume constant qui est le volume de calibrage (0,785 L). La compacité du mélange (c'est-à-dire des granulats fins et grossiers) est obtenue par le rapport de sa compacité après compactage et sa compacité réelle.

### **4.3. Phase II : Évaluation de l'effet des caractéristiques des granulats sur la rhéologie et les propriétés mécaniques du BAP-éco**

Les 20 combinaisons de granulats ont été utilisées pour préparer des mélanges BAP-éco. Ces formulations sont proportionnées avec une teneur totale en liant de 309 kg/m<sup>3</sup> et un volume de granulat de 29%. Les paramètres de formulation sont mentionnés dans le chapitre 5. Le dosage du SP a été optimisé en déterminé en utilisant les mélanges proportionnés avec les granulats ayant des compacités granulaires théoriques et expérimentales minimales et maximales. Les propriétés du béton à l'état frais et la résistance à la compression obtenue après 28 jours sont étudiées.



#### 4.4. Phase III : Optimisation du volume de pâte des mélanges formulés dans la Phase II

Les formulations de BAP-éco ayant une meilleure fluidité, résistance au blocage et à la ségrégation identifiés dans la Phase II sont utilisées pour optimiser le volume de pâte. Trois différents niveaux de maniabilité sont considérés: faible, moyen et élevé. En conséquence, les mélanges qui présentent un niveau moyen ou élevé des trois aspects de l'ouvrabilité (meilleure fluidité, résistance au blocage et à la ségrégation) sont sélectionnés pour la troisième phase afin d'optimiser leur volume de pâte. La figure 4.1 présente les différentes phases et étapes du plan expérimental.

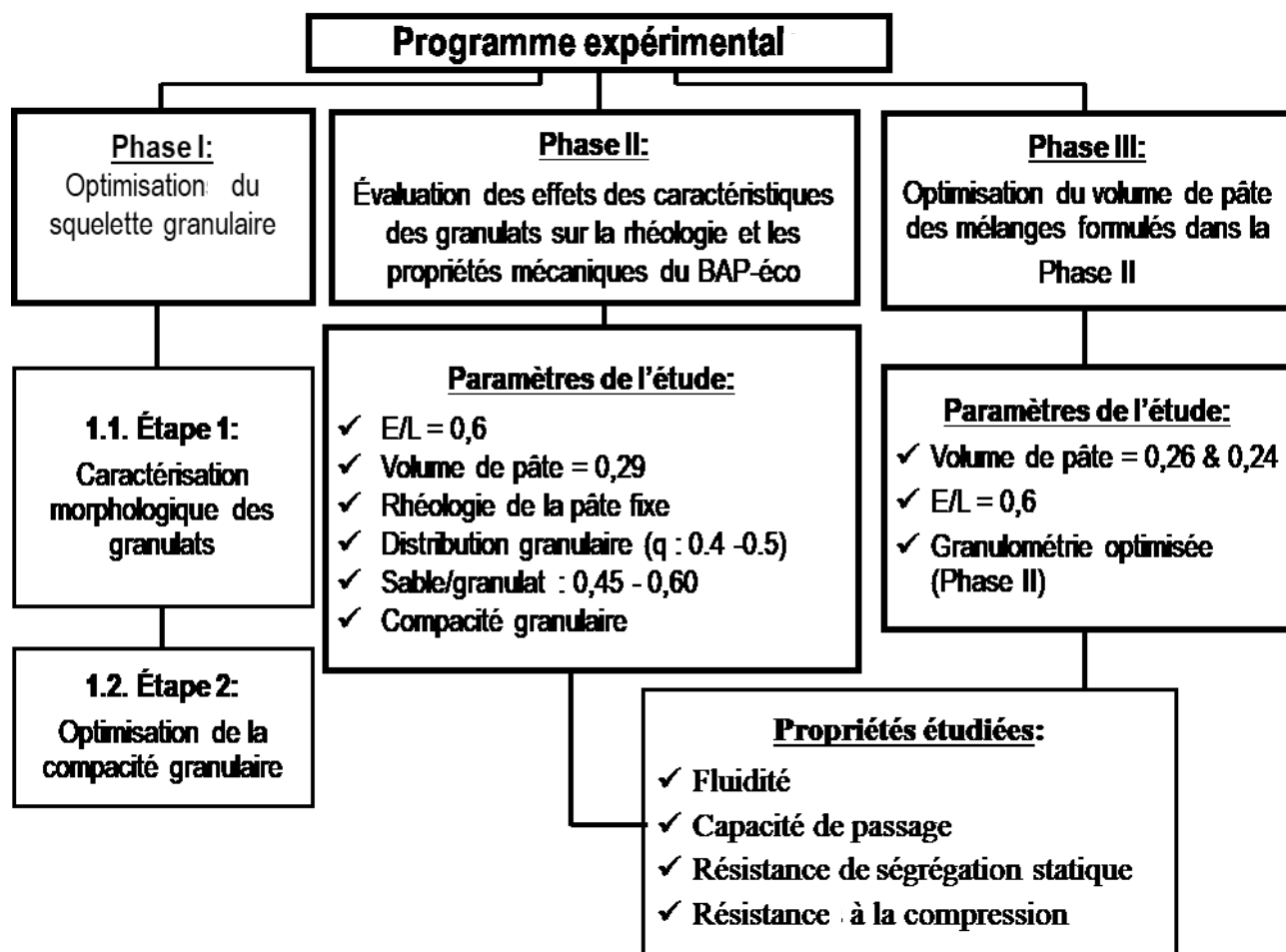


Figure 4.1 Organigramme du projet de recherche

## 4.5. Matériaux Utilisés

### 4.5.1. Ciment

Le liant utilisé pour confectionner les bétons étudiés est un liant ternaire composé de 70% de ciment portland GU, 25% de cendres volantes et 5% de fumée de silice. Ce ciment se caractérise par une densité de  $2,96 \text{ kg/m}^3$  et d'une finesse Blaine d'environ  $400 \pm 1 \text{ m}^2/\text{kg}$ .

### 4.5.2. Granulats

Les granulométries des différentes sources de granulats utilisés dans cette étude sont présentées à la Fig. 4.2. Pour chaque source de granulat (sources I, II, III et IV), différentes classes de granulats fins et grossiers ont été utilisées. Les caractéristiques physiques de ces granulats sont résumées comme suit:

Les granulats de la source I sont constitués d'un sable naturel (Sable I) et de trois différentes classes de granulats grossiers de calcaire concassé CAI1, CAI2 et CAI3 de tailles nominales respectivement de 0-5, 5-10, 5-14 et 5-20 mm. La gravité spécifique et l'absorption d'eau des sables I, CAI1, CAI2 et CAI3 sont respectivement de 2,64, 2,72, 2,73, 2,76 et 1,09%, 0,42%, 0,49% et 0,46%.

La source II comprend cinq classes de granulats, dont un sable naturel de rivière (Sable II) et quatre classes des granulats grossiers de calcaire concassé de 5-10 mm (CAII1), 5-14 mm (CAII2), 5-14 mm (CAII3) et 10-20 mm (CAII4). Le sable II et les CAII1 à CAII4 ont une gravité spécifique de 2,67, 2,72, 2,74, 2,72, 2,74 et une absorption d'eau de 1,05%, 0,34%, 0,29%, 0,36% et 0,17%, respectivement.

La source III comprend un sable naturel de rivière (sable III) et trois classes différentes d'agrégats grossiers de calcaire concassé correspondant à CAIII1, CAIII2 et CAIII3 de tailles nominales de 0-5, 5-10, 5-14 et 5-20 mm, respectivement. La gravité spécifique et l'absorption d'eau du Sable III, CAIII1, CAIII2 et CAIII3 sont respectivement de 2,71, 2,71, 2,73, 2,76 et 0,55%, 0,43%, 0,53% et 0,67%.

La source IV est constituée d'un sable naturel (Sable IV) et d'un granulat grossier CAIV1 de tailles nominales de respectivement de 0-5 et 5-14 mm. Les granulats sable IV et CAIV1 ont une gravité spécifique et une absorption d'eau de respectivement de 2,66 et 2,80, et 1,34% et 0,45%.

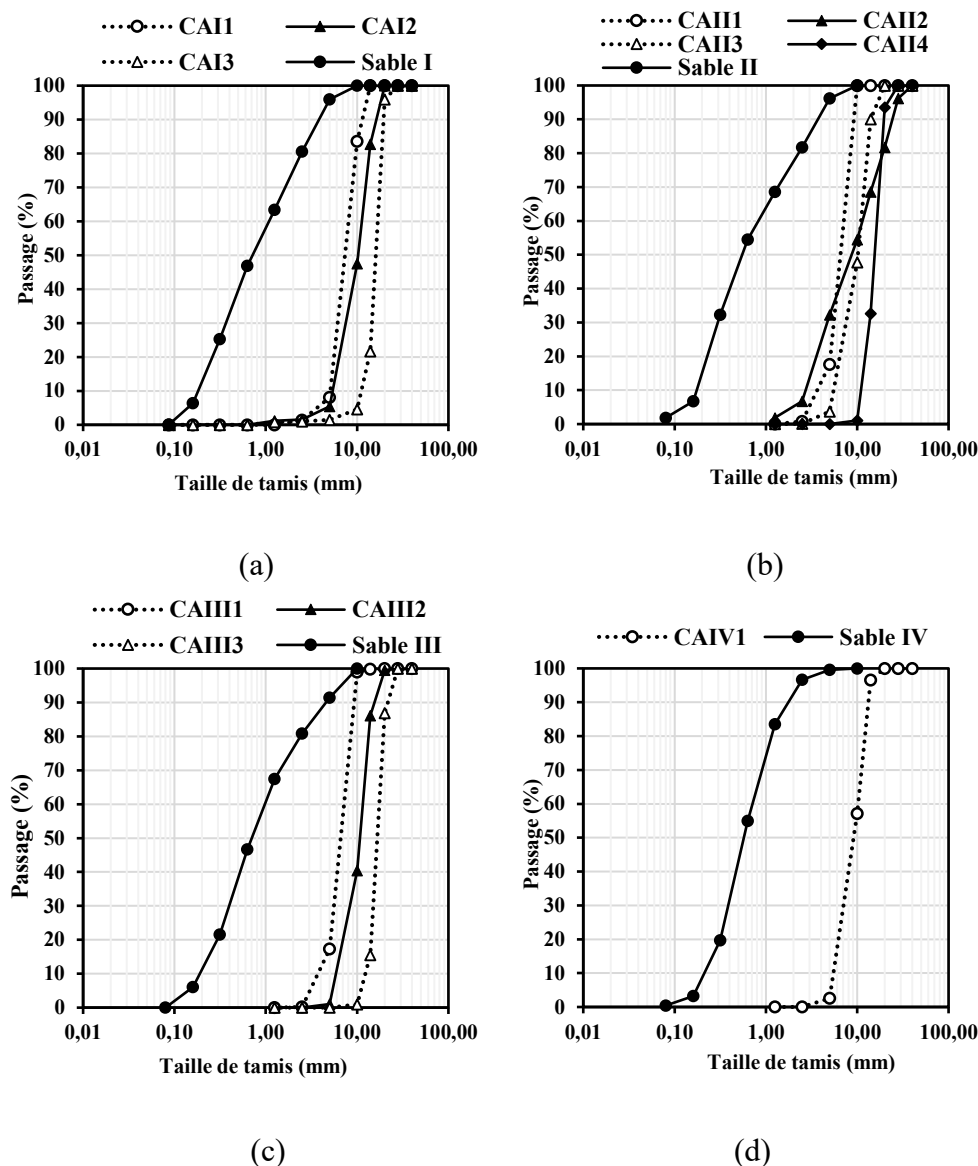


Figure 4.2 Courbes granulométriques de différentes sources de granulats (a) I, (b) II, (c) III, et (d) IV.

### 4.5.3. Adjuvants chimiques

Un superplastifiant (SP) à base de polycarboxylate (PC) ayant une teneur en solides et une densité de respectivement 20,5% et  $1,046 \text{ g/cm}^3$  a été utilisé pour améliorer la fluidité des bétons étudiés. De plus, un agent entraîneur d'air compatible (AEA) de densité  $1,011 \text{ g/cm}^3$  et une teneur en solides de 15% a été utilisé.

## 4.6. Méthodes de caractérisation

### 4.6.1. Évaluation des caractéristiques morphologiques des granulats

Pour chaque source de granulat (I à IV), les granulats fins et grossiers ont été classés dans diverses sous-classes, correspondant aux tamis standard successifs (tableaux 4.1 à 4.4). Dans chacune des sous-classes de granulats, 9 particules plus grandes que 1,25 mm et 27 plus fines que 1,25 mm ont été sélectionnées de manière aléatoire (c'est-à-dire, au total, 1035 particules provenant de toutes les sources). Les granulats les plus grossiers ( $> 1,25$  mm) sont numérisés à l'aide du scanner laser 3D MAXscan (Fig. 4.4-a). À l'aide des logiciels VXelement et MeshLab, les fichiers CSF (3D GeoMedia Coordinate System) des images numérisées ont été convertis en types de stéréolithographie (STL) pour être analysés par des outils de conception assistée par ordinateur (CAD). À l'aide du logiciel Fusion360, les configurations 3D capturées de chaque particule sélectionnée ont été découpées en 3 sections transversales différentes (plans XZ, XY et YZ) et, par conséquent, converties en trois images 2D (Fig. 4.4-b). D'autre part, en raison de la limitation de résolution du scanner 3D, l'ensemble des sous-classes correspondant à 0-0,315 et 0,315 à 1,25 mm est visualisé à l'aide respectivement des microscopes électroniques Hitachi S-3400N (Fig. 4.4-c) et optique (Fig. 4.4-d).

Afin d'évaluer les caractéristiques morphologiques du granulat, toutes les images transversale 2D (Fig. 4.4-b) et microscopiques (Figs. 4.4-e et f) ont été examinées à l'aide de techniques d'analyse d'image. En conséquence, en utilisant le logiciel ImageJ, chaque image 2D est convertie en images binaires (Fig. 4.4-g), puis analysée par le Shape Filter plugin (Wagner et Lipinski, 2013). Ce plugin peut évaluer différentes caractéristiques de forme, y compris la surface « A » et le périmètre « P » des objets 2D (Fig. 4.4-h), ainsi que la surface «  $A_{Conv.H}$  » et le périmètre «  $P_{Conv.H}$  » de la coque convexe et du contour extérieur des objets 2D (Fig. 4.4-i). Les côtés plus grands et plus petits du rectangle de délimitation minimal, qui correspondent respectivement aux diamètres maximum «  $D_{max}$  » et minimum «  $D_{min}$  » des objets 2D (Fig 4.4-h), sont également déterminés. Les caractéristiques morphologiques de chaque sous-classe du granulat peuvent être décrites comme suit: a) taille: y compris les valeurs moyennes  $D_{max}$  «  $MD_{max}$  »,  $D_{min}$  «  $MD_{min}$  » et diamètre moyen «  $D_{avg}$  », b) forme: y compris le facteur de forme « AR » et la circularité « C » et c) rugosité de surface « R ». En conséquence, les équations suivantes: (4.1 à 4.6) sont proposées pour évaluer les caractéristiques morphologiques moyennes de la sous-classe « i » de différentes sources (I à IV) de granulats, y compris  $MD_{max}$ ,  $MD_{min}$ ,  $D_{avg}$ , AR, C et R.

$$\text{Diamètre moyen le plus long: } MD_{\max_i} = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m D_{\max_{jk}}}{n \times m} \quad \text{Équation 4.2}$$

$$\text{Diamètre moyen le plus court: } MD_{\min_i} = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m D_{\min_{jk}}}{n \times m} \quad \text{Équation 4.3}$$

$$\text{Diamètre moyen: } D_{\text{avg}_i} = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m (D_{\max_{jk}} + D_{\min_{jk}})}{n \times m} \quad \text{Équation 4.4}$$

$$\text{Rapport d'aspect moyen: } AR_i = \frac{\sum_{j=1}^n \frac{\sum_{k=1}^m AR_{jk} \times A_{jk}}{\sum_{k=1}^m A_{jk}}}{n} \quad \text{Où } AR_{jk} = \frac{D_{\max_{jk}}}{D_{\min_{jk}}} \quad \text{Équation 4.5}$$

$$\text{Circularité moyenne: } C_i = \frac{\sum_{j=1}^n \frac{\sum_{k=1}^m C_{jk} \times A_{jk}}{\sum_{k=1}^m A_{jk}}}{n} \quad \text{Où } C_{jk} = \frac{4\pi \times A_{jk}}{P_{jk}^2} \quad \text{Équation 4.6}$$

$$\text{Rugosité moyenne: } R_i = \frac{\sum_{j=1}^n \frac{\sum_{k=1}^m R_{jk} \times P_{\text{Conv.H}_{jk}}}{\sum_{k=1}^m P_{\text{Conv.H}_{jk}}}}{n} \quad \text{Où } R_{jk} = \frac{|A_{\text{Conv.H}_{jk}} - A_{jk}|}{P_{\text{Conv.H}_{jk}}} \quad \text{Équation 4.7}$$

Où n (9 et 27) sont respectivement le nombre de particules plus grandes et plus fines que 1,25 mm pour chaque sous-classe. Par ailleurs, m (= 3 et 1) sont respectivement le nombre d'images 2D pour les échantillons de chaque sous-classe plus grossiers (>1,25 mm) et plus fins (<1,25 mm). Il convient de mentionner que des valeurs de rapport d'aspect plus élevées correspondent à des particules plus allongées. D'autre part, les valeurs de circularité montrent comment les configurations 2D (Figs. 4.4-b et 4.4-g) des granulats sont proches d'un cercle parfait. En effet, des valeurs de circularité plus proches de l'unité correspondent à des particules plus arrondies. Les caractéristiques morphologiques évaluées calculées en utilisant les Éqs. 4.1 à 4.6 de différentes sous-classes correspondant aux quatre sources de granulats sont présentées dans les tableaux 4.1 à 4.4.

#### 4.6.2. Détermination de la compacité expérimentale des mélanges

La compacité granulaire expérimentale de ces mélanges a été déterminée en utilisant le compacteur à cisaillement giratoire (ICT-100R) (Fig.4.3). L'essai est effectué sous une pression minimale de 20 kPa et 150 cycles. La masse utilisée pour réaliser ces essais correspond à un volume constant correspondant au volume de calibrage (0,785 L). La compacité du mélange est le rapport de sa masse volumique après compactage et de sa masse volumique réelle.



*Figure 4.3 Le compacteur à cisaillement giratoire (ICT-100R)*

#### **4.6.3. Dosage des mélanges granulaires étudiés de la source**

Les distributions granulométriques de 20 mélanges granulaires de granulats de la source I sont étudiées. Ces mélanges ont été proportionnés à l'aide du modèle Funk-Dinger (Funk et Dinger, 1994) (Éq. 2.10) en sélectionnant cinq modules de distribution différents ( $q$ ) de 0,400, 0,425, 0,450, 0,475 et 0,500, ainsi que quatre différents rapports volumétriques de sable par rapport à la masse totale des granulats ( $S/G$ ) de 0,45, 0,50, 0,55 et 0,60. Selon les tailles nominales du granulat de la source I, les valeurs de  $d_{\min}$  et  $d_{\max}$  dans l'équation (2.10) ont été fixés respectivement à 0 et 20 mm. dans le modèle Fuller-Thomson (Fuller et Thomson, 1907) (Éq. 2.8).

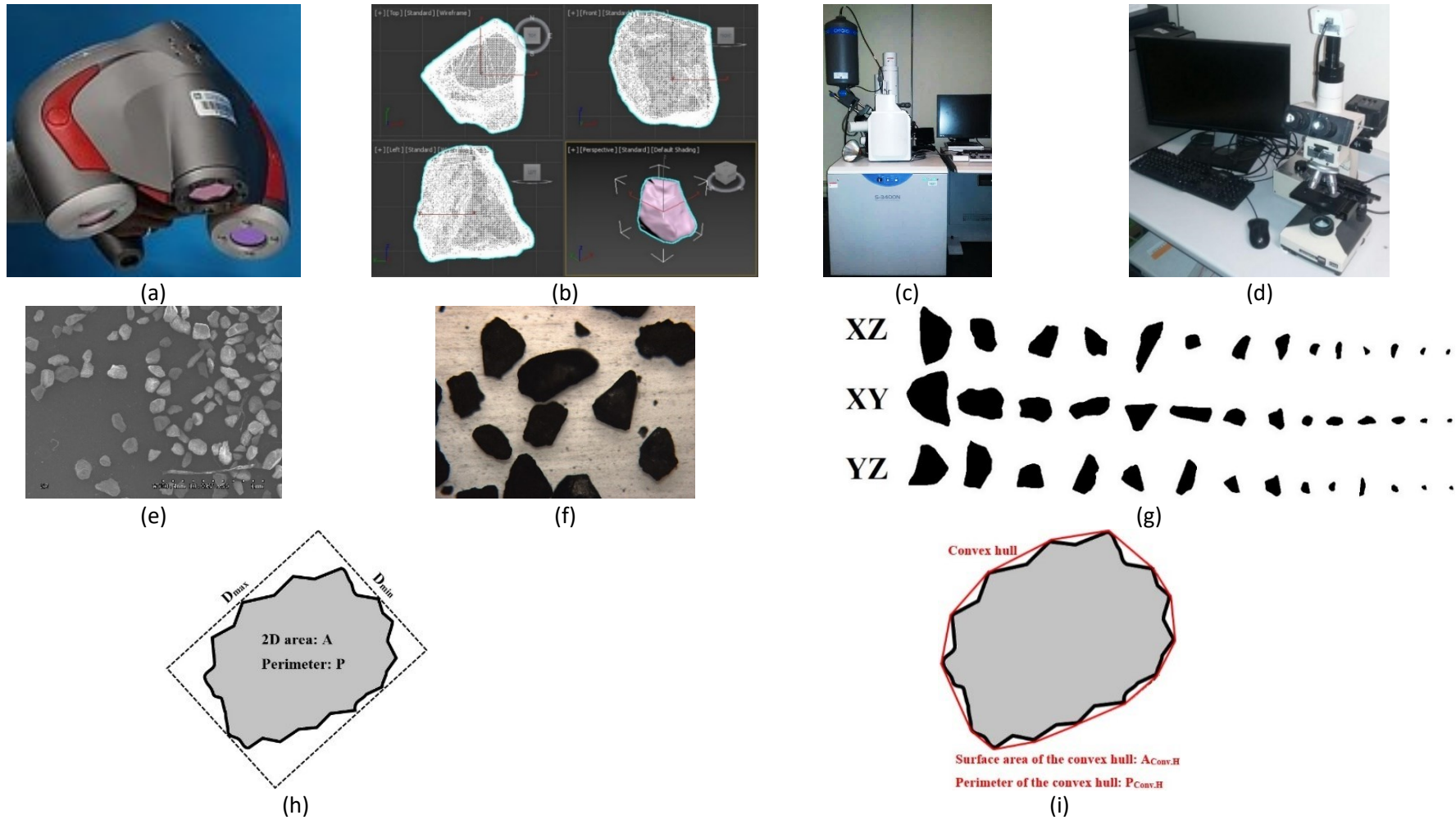


Figure 4.4 (a) 3D MAXscan, (b) Analyse d'images 3D du granulat scanné et de ses coupes 2D, (c) Hitachi S-3400N et (d) microscopes optiques, (e) et (f) exemples d'images microscopiques prises (g) des images binaires 2D converties, (h) la configuration 2D du granulat et (i) sa coque convexe correspondante.

*Tableau 4.1 Compacité granulaire expérimentale et caractéristiques morphologiques de différentes sous-classes des granulats de la source I.*

Sous-classe d'agrégat No.	Gamme de tailles de tamis mm	Source de classe d'agrégat	Compacité granulaire expérimentale* ( $\alpha_i$ ) (Éq. 2.14)	MD <sub>max</sub> (mm) (Éq. 4.1)	MD <sub>min</sub> (mm) (Éq. 4.2)	D <sub>avg</sub> (mm) (Éq. 4.3)	AR (Éq. 4.4)	C (Éq. 4.5)	R (µm) (Éq. 4.6)
1	20 – 28	CAI3	0,452	d <sub>max</sub> = 27,840	17,543	22,692	1,637	0,781	244
2	14 – 20	CAI3	0,460	24,219	16,854	20,536	1,463	0,846	199
3	14 – 20	CAI2	0,467	18,655	12,309	15,482	1,568	0,822	152
4	10 – 14	CAI3	0,472	22,340	11,013	16,676	2,269	0,694	203
5	10 – 14	CAI2	0,490	16,765	11,366	14,065	1,538	0,827	144
6	10 – 14	CAI1	0,486	13,920	9,631	11,776	1,469	0,845	112
7	5 – 10	CAI2	0,498	12,035	8,762	10,399	1,406	0,851	109
8	5 – 10	CAI1	0,502	17,810	7,801	12,806	2,524	0,677	152
9	5 – 10	Sable I	0,511	7,146	5,293	6,219	1,374	0,946	62
10	2,5 – 5	CAI2	0,520	7,564	4,244	5,904	1,860	0,879	62
11	2,5 – 5	CAI1	0,513	9,947	4,056	7,001	2,665	0,727	82
12	2,5 – 5	Sable I	0,528	6,479	3,961	5,220	1,713	0,923	51
13	1,25 – 2,5	CAI1 et CAI2	0,530	3,893	2,348	3,120	1,757	0,947	42
14	1,25 – 2,5	Sable I	0,546	3,012	2,050	2,531	1,492	0,956	32
15	0,630 – 1,25	Sable I	0,561	1,222	0,903	1,062	1,417	0,636	9,4
16	0,315 – 0,630	Sable I	0,575	0,535	0,409	0,472	1,364	0,724	4,0
17	0,160 – 0,315	Sable I	0,580	0,291	0,226	0,259	1,301	0,740	2,3
18	0,080 – 0,160	Sable I	0,587	0,156	0,114	0,135	1,388	0,748	1,8
19	0 – 0,080	Sable I	0,613	0,028	d <sub>min</sub> = 0,021	0,024	1,303	0,853	0,6

\*Mesuré expérimentalement en utilisant le compacteur à cisaillement giratoire (ICT-.100R)



*Tableau 4.2 Les caractéristiques morphologiques des différentes sous-classes de granulats de la source II.*

Sous-classe d'agrégat No.	Gamme de tailles de tamis mm	Source de classe d'agrégat	MD <sub>max</sub> (mm) Éq. 4.1	MD <sub>min</sub> (mm) Éq. 4.2	D <sub>avg</sub> (mm) Éq. 4.3	AR Éq. 4.4	C Éq. 4.5	R (µm) Éq. 4.6
1	20 – 28	CAII4	d <sub>max</sub> = 32,063	25,069	28,566	1,303	0,802	266
2	14 – 20	CAII4	24,688	18,318	21,503	1,367	0,806	188
3	14 – 20	CAII3	22,252	18,406	20,329	1,219	0,829	173
4	10 – 14	CAII3	18,010	13,082	15,546	1,387	0,840	128
5	10 – 14	CAII4	17,512	13,196	15,354	1,346	0,859	153
6	10 – 14	CAII2	16,266	12,898	14,582	1,268	0,871	106
7	5 – 10	CAII4	16,960	8,995	12,978	1,886	0,759	105
8	5 – 10	CAII3	14,634	9,002	11,818	1,647	0,788	117
9	5 – 10	CAII2	12,427	9,141	10,784	1,375	0,852	102
10	5 – 10	CAII1	12,085	9,323	10,704	1,307	0,840	96
11	2,5 – 5	CAII1	12,615	4,862	8,738	2,645	0,633	72
12	5 – 10	Sable II	8,937	6,805	7,871	1,331	0,902	27
13	2,5 – 5	CAII3	10,761	4,327	7,544	2,530	0,677	92
14	2,5 – 5	CAII2	9,489	4,456	6,973	2,164	0,738	80
15	2,5 – 5	Sable II	8,019	4,429	6,224	1,842	0,828	34
16	1,25 – 2,5	CAII3	3,881	2,050	2,966	1,958	0,754	37
17	1,25 – 2,5	CAII1	3,518	2,287	2,903	1,594	0,756	27
18	1,25 – 2,5	Sable II	2,130	1,728	1,929	1,243	0,246	13
19	0,63 – 1,25	Sable II	1,174	0,934	1,054	1,261	0,320	7,8
20	0,315 – 0,63	Sable II	0,635	0,482	0,558	1,344	0,418	7,2
21	0,160 – 0,315	Sable II	0,364	0,245	0,305	1,545	0,722	3,8
22	0,080 – 0,160	Sable II	0,218	0,129	0,174	1,790	0,688	2,9
23	0 – 0,080	Sable II	0,049	d <sub>min</sub> = 0,032	0,040	1,640	0,617	1,4

*Tableau 4.3 Les caractéristiques morphologiques des différentes sous-classes de granulats de la source III*

Sous-classe d'agrégat No.	Gamme de tailles de tamis mm	Source de classe d'agrégat	MD <sub>max</sub> (mm) Éq. 4.1	MD <sub>min</sub> (mm) Éq. 4.2	D <sub>avg</sub> (mm) Éq. 4.3	AR Éq. 4.4	C Éq. 4.5	R (µm) Éq. 4.6
1	20 – 28	CAIII2	d <sub>max</sub> = 31,495	25,210	28,353	1,270	0,758	337
2	20 – 28	CAIII3	29,145	24,378	26,762	1,207	0,856	180
3	14 – 20	CAIII1	34,710	17,313	26,012	2,005	0,700	154
4	14 – 20	CAIII3	26,150	19,409	22,779	1,359	0,857	144
5	14 – 20	CAIII2	23,239	18,560	20,900	1,258	0,837	156
6	5 – 10	CAIII3	21,294	8,604	14,949	2,589	0,644	101
7	10 – 14	CAIII2	19,326	10,160	14,743	1,915	0,711	150
8	10 – 14	CAIII3	17,649	11,799	14,724	1,533	0,808	162
9	10 – 14	CAIII1	14,923	12,717	13,820	1,189	0,798	106
10	5 – 10	CAIII1	11,722	9,224	10,473	1,280	0,850	94
11	5 – 10	CAIII2	11,536	6,013	8,775	1,946	0,732	97
12	5 – 10	Sable III	9,141	7,681	8,411	1,197	0,915	41
13	2,5 – 5	CAIII1	10,885	4,814	7,849	2,264	0,698	82
14	2,5 – 5	CAIII2	7,535	4,738	6,136	1,607	0,833	54
15	2,5 – 5	Sable III	5,084	4,343	4,714	1,183	0,911	30
16	1,25 – 2,5	CAIII1	4,466	2,354	3,410	1,953	0,717	34
17	1,25 – 2,5	CAIII2	3,121	2,095	2,608	1,524	0,780	31
18	1,25 – 2,5	Sable III	2,018	1,684	1,851	1,208	0,221	17
19	0,630 – 1,25	Sable III	1,179	0,946	1,062	1,261	0,305	11
20	0,315 – 0,630	Sable III	0,594	0,448	0,521	1,358	0,522	5,3
21	0,160 – 315	Sable III	0,370	0,245	0,307	1,577	0,684	3,7
22	0,080 – 0,160	Sable III	0,203	d <sub>min</sub> = 0,133	0,168	1,568	0,657	2,4

*Tableau 4.4 Les caractéristiques morphologiques des différentes sous-classes de granulats de la source IV.*

Sous-classe d'agrégat No.	Gamme de tailles de tamis mm	Source de classe d'agrégat	MD <sub>max</sub> mm (Éq. 4.1)	MD <sub>min</sub> (mm) Éq. 4.2	D <sub>avg</sub> (mm) Éq. 4.3	AR Éq. 4.4	C Éq. 4.5	R (µm) Éq. 4.6
1	14 -20 (20)	CAIV1	d <sub>max</sub> = 19,447	17,641	18,544	1,107	0,851	154
2	10 -14 (20)	CAIV1	17,735	13,748	15,742	1,293	0,881	105
3	5-10(20)	CAIV1	13,019	9,109	11,064	1,444	0,846	112
4	5-10 (s)	Sable IV	9,131	7,456	8,294	1,227	0,890	44
5	2,5-5 (20)	CAIV1	9,770	4,609	7,190	2,159	0,746	85
6	2,5-5 (s)	Sable IV	5,192	4,186	4,689	1,258	0,907	32
7	1,25- 2,5 (20)	CAIV1	3,571	2,284	2,928	1,624	0,836	33
8	1,25- 2,5 (s)	Sable IV	1,949	1,620	1,784	1,218	0,274	14
9	0,63-1,25 (s)	Sable IV	1,128	0,919	1,023	1,250	0,371	8,3
10	0,315 -0,63(s)	Sable IV	0,611	0,470	0,540	1,322	0,467	5,8
11	0,160-,315(s)	Sable IV	0,409	0,275	0,342	1,560	0,635	4,4
12	0,08-0,16 (s)	Sable IV	0,157	0,110	0,133	1,501	0,624	5,4
13	0-0,08 (s)	Sable IV	0,070	d <sub>min</sub> = 0,043	0,057	1,712	0,587	2,0

Pour une valeur donnée du rapport volumétrique sable/granulats total (S/G de 0,45 à 0,60), un solveur Microsoft Excel non linéaire à gradient réduit généralisé (GRG) a été développé pour calculer le contenu volumétrique de chacune des quatre classes principales des granulats fins et grossiers de la source I (c.-à-d. sable I, CAI1, CAI2 et CAI3). Les distributions granulométriques les plus proches des granulométries théoriques sont ainsi obtenues en utilisant le modèle Funk-Dinger (Funk et Dinger, 1994) avec des valeurs « q » de 0,400 à 0,500. Les proportions volumétriques des 20 mélanges granulaires sélectionnés (c'est-à-dire M1 à M20), ainsi que leurs compacités granulaires expérimentales sont présentés dans le tableau 4.5. La compacité granulaire a été mesurée à l'aide d'un compacteur à cisaillement giratoire (ICT-100R). D'autre part, les valeurs théoriques de la compacité granulaire des mélanges granulaires sélectionnés ont été estimées à l'aide des équations 2.14 - 2.17. Les valeurs expérimentales de la compacité granulaire (c'est-à-dire  $\alpha_i = 1$  à 19 dans le tableau 4.1) de différentes sous-classes de granulats de la source I sont présentées dans le tableau 4.5.

Les courbes théoriques de Funk-Dinger correspondant à des valeurs de q de 0,4 et 0,5 et les distributions granulométriques expérimentales des mélanges granulaires sélectionnés avec différents rapports S/G sont présentées sur la Fig. 4.5. Selon la fraction volumétrique de chaque sous-classe de granulats ( $\varphi_i = 1$  à 19 dans le tableau 4.1) dans chaque mélange granulaire M1 à M20, la moyenne arithmétique pondérée volumétrique des caractéristiques morphologiques ( $\overline{MC}_{1 \text{ to } 20}$  :  $\overline{D_{avg}}_{1 \text{ to } 20}$ ,  $\overline{AR}_{1 \text{ to } 20}$ ,  $\overline{C}_{1 \text{ to } 20}$ ,  $\overline{S}_{1 \text{ to } 20}$  et  $\overline{R}_{1 \text{ to } 20}$ ) des 20 systèmes granulaires (M1 à M20) peut être estimés comme suit:

$$\overline{MC} = \frac{\sum_{i=1}^{n=19} \varphi_i \times MC_i}{\sum_{i=1}^{n=19} \varphi_i = 1} \quad \text{Équation 4.8}$$

Où  $MC_i$  correspond aux caractéristiques morphologiques de la sous-classe de granulat « i », y sont respectivement les valeurs de  $D_{avg}$ , AR, C et R obtenues à l'aide des équations. (4.3 :4.7). Les caractéristiques morphologiques moyennes des 20 mélanges granulaires sélectionnés M1 à M20 sont présentées dans le tableau 4.5.

Tableau 4.5 Proportions volumétriques, compacité granulaire théorique et expérimentale, ainsi que les caractéristiques morphologiques moyennes des 20 squelettes granulaires sélectionnés (source I)

Mélange granulaire No.	q (Éq. 2.10)	Fraction volumétrique				Compacité granulaire		Caractéristiques morphologiques moyennes			
		Sable I (S/G)	CAI1	CAI2	CAI3	Théorique	Expérimentale	$\overline{D}_{avg}$ (mm) (Éqs. 4.3 et 4.7)	$\overline{AR}$ (Éqs 4.4 et 4.7)	$\overline{C}$ (Éqs. 4.5 et 4.7)	$\overline{R}$ (µm) (Éqs . 4.6 et 4.7)
M1	0,400	0,450	0,378	0,000	0,172	0,589	0,755	8,651	1,804	0,777	94
M2		0,500	0,280	0,053	0,167	0,587	0,758	8,169	1,721	0,787	88
M3		0,550	0,097	0,230	0,123	0,589	0,742	7,341	1,566	0,809	77
M4		0,600	0,000	0,287	0,113	0,584	0,773	6,784	1,482	0,819	70
M5	0,425	0,450	0,361	0,000	0,189	0,586	0,733	8,808	1,791	0,779	95
M6		0,500	0,196	0,151	0,152	0,590	0,757	8,048	1,654	0,797	85
M7		0,550	0,014	0,328	0,108	0,594	0,755	7,298	1,493	0,820	75
M8		0,600	0,000	0,267	0,133	0,580	0,768	6,934	1,485	0,819	71
M9	0,450	0,450	0,299	0,068	0,183	0,590	0,744	8,755	1,742	0,786	94
M10		0,500	0,116	0,245	0,139	0,595	0,763	8,001	1,589	0,807	84
M11		0,550	0,000	0,328	0,122	0,593	0,746	7,377	1,487	0,820	76
M12		0,600	0,000	0,247	0,153	0,577	0,757	7,084	1,488	0,818	73
M13	0,475	0,450	0,222	0,157	0,171	0,595	0,745	8,708	1,677	0,796	92
M14		0,500	0,039	0,334	0,126	0,560	0,741	7,955	1,523	0,817	82
M15		0,550	0,000	0,309	0,141	0,589	0,742	7,527	1,490	0,820	77
M16		0,600	0,000	0,228	0,172	0,573	0,748	7,235	1,492	0,817	74
M17	0,500	0,450	0,149	0,242	0,159	0,600	0,763	8,658	1,619	0,804	91
M18		0,500	0,000	0,371	0,129	0,601	0,759	7,969	1,492	0,821	82
M19		0,550	0,000	0,290	0,160	0,585	0,750	7,677	1,493	0,819	79
M20		0,600	0,000	0,209	0,191	0,569	0,755	7,385	1,495	0,816	76

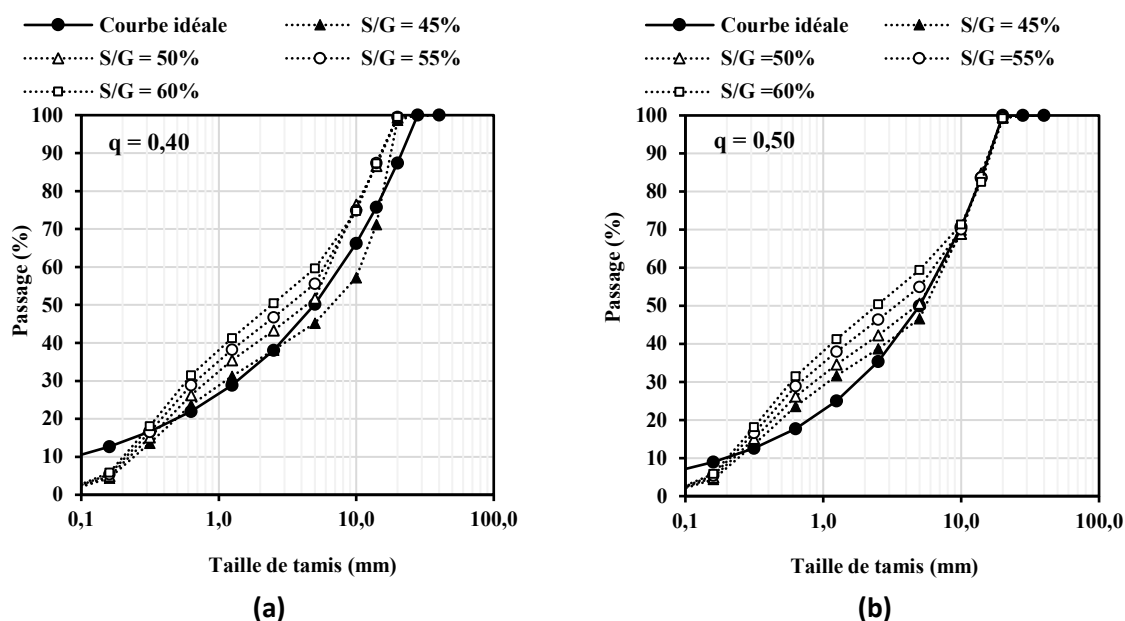


Figure 4.5 Modèles théoriques de Fuller-Thompson avec les valeurs de  $q$  (a) 0,4 et (b) 0,5 et les distributions granulaires expérimentales sélectionnés avec différents rapports S/G de 0,45 à 0,60.

#### 4.6.4. Préparation du béton

Dans cette étude, différents mélanges BAP-éco sont formulés en utilisant les squelettes granulaires ayant différentes distributions de tailles optimisées pour minimiser leur teneur en liant et leur volume de pâte. En conséquence, différentes combinaisons de différentes sous-classes de granulats fins et grossiers, fournissant ainsi différents rapports sable/granat total et modules de distribution de Fuller-Thompson (Fuller et Thomson, 1907), sont étudiées. Les dimensions morphologiques des sous-classes obtenues sont évaluées à l'aide de techniques d'analyse d'images. Les dimensions sont ensuite utilisées pour optimiser la distribution granulométrique du squelette granulaire afin de déterminer les nouveaux modèles de distribution pour les applications BAP-éco. Les résultats des modèles proposés sont validés en utilisant deux autres sources de granulats différentes. Les caractéristiques physiques et morphologiques des trois sources de granulats, les demande en superplastifiant et les résultats de maniabilité des BAP-éco étudiés sont présentés dans cette section:

##### 4.6.4.1. Proportion des mélanges granulaires de la source I étudiés

Afin d'optimiser le modèle de distribution granulaire pour formuler les BAP-éco, 20 mélanges granulaires différents de granulats de la source I ont été étudiés. Ces mélanges ont été formulés en utilisant cinq les de distribution Funk-Dinger (Funk et Dinger, 1994) (Éq. 2.10) différents «  $q$  »

de 0,400, 0,425, 0,450, 0,475 et 0,500, ainsi que différents volumétriques sable/granulat total (S/G) de 0,45, 0,50, 0,55 et 0,60. Selon les tailles nominales du granulat de la source I, les valeurs de  $d_{\min}$  et  $d_{\max}$  (Éq. 2.10) ont été fixées respectivement à 0 et 20 mm, ce qui équivaut au modèle Fuller-Thompson (Fuller et Thomson, 1907) (Éq. 2.8). Par la suite, pour un rapport S/G donné, le contenu volumétrique de chacune des classes Sable I, CAI1, CAI2 et CAI3 ont été calculés afin d'obtenir les distributions granulométriques les plus proches des distribution granulaires théoriques obtenues par le modèle Fuller-Thompson (Fuller et Thomson, 1907) ou Funk-Dinger (Funk et Dinger, 1994). Les proportions volumétriques des 20 mélanges granulaires sélectionnés (c'est-à-dire M1 à M20), ainsi que leurs valeurs expérimentales de compacité granulaire sont présentés dans le tableau 4.5. La compacité granulaire a été mesurée à l'aide d'un compacteur à cisaillement giratoire (ICT-100R). À titre d'exemple, les courbes théoriques Fuller-Thompson correspondant à des valeurs  $q$  de 0,4 et 0,5 et les courbes de granulométrie expérimentales des mélanges granulaires sélectionnés avec différents rapports S/G sont présentées sur la Fig. 4.5.

#### **4.6.4.2. Paramètres de mélange, ouvrabilité et les résistances à la compression**

Tous les mélanges BAP-éco étudiés sont proportionnés avec un rapport eau/liant (E/L) de 0,60 pour obtenir un BSAP avec un étalement minimal (ASTM C1611M, 2014) de 450 mm (Aïssoun *et al.*, 2016; Leclerc, 2011; Sotomayor Cruz, 2012) et des résistances à la compression après 28 jours ( $f'_{c-28d}$ ) de 25 à 30 MPa. Cette classe de béton est conçue pour les applications résidentielles. Un ciment mélangé ternaire (TerC<sup>3</sup>) contenant 75% de ciment Portland à usage général (GU), 20% de cendres volantes de classe F et 5% de fumée de silice est utilisé. Un superplastifiant à base de polycarboxylate (HRWR) avec 20% de contenu solide est utilisé pour améliorer la fluidité des mélanges. Afin d'assurer une résistance appropriée aux cycles de gel-dégel, une teneur en air comprise entre 4% et 7% a été ciblée (CSA A23.1). En conséquence, tous les mélanges contiennent un dosage optimal d'agent entraîneur d'air (AEA) de 16 ml/100 kg de liant.

La maniabilité des BAP a été évaluée en utilisant l'essai d'étalement et le cône d'écoulement V-Funnel. D'autre part, l'essai J-Ring est utilisé pour évaluer la capacité de passage des BAP. Une différence entre l'étalement et le J-Ring ( $\Delta_{J-Ring}$ ) fait référence à une capacité de passage du mélange BAP. La stabilité statique des mélanges a été évaluée par l'essai de stabilité au tamis. De plus, afin d'évaluer la résistance à la compression des formulations étudiées, trois

cylindres de  $100 \times 200$  mm ont été coulés et durcis dans une chambre à température contrôlée et une humidité relative de 100% jusqu'à l'âge de l'essai (c'est-à-dire 28 jours).

#### **4.6.5. Approche expérimentale pour déterminer la courbe de granulométrie idéale**

La procédure générale est réalisée en étapes successive pour déterminer la courbe de granulométrie idéale et minimiser le contenu volumétrique du liant et de la pâte de ciment est décrite sur la Fig. 4.6, comme suit:

##### **4.6.5.1. 1<sup>ère</sup> étape: Volume de pâte ( $V_P$ ) de 29%**

Comme on peut l'observer sur la Fig. 4.6, la première étape consiste à fabriquer 20 mélanges BAP-éco, formulés en utilisant les squelettes granulaires SG-1 de M1 à M20 (comme présenté dans le tableau 4.5), un volume de pâte ( $V_P$ ) de 29% et un rapport E/L de 0,60. Cela correspond à une teneur en liant de  $309 \text{ kg/m}^3$ , dont  $231,75 \text{ kg/m}^3$  de GU,  $61,80 \text{ kg/m}^3$  de cendres volantes (F) et  $15,45 \text{ kg/m}^3$  de fumée de silice. Afin d'assurer un étalement minimal de 450 mm, correspondant à l'objectif d'ouvrabilité (BSAP), un dosage en superplastifiant de 900 ml/100 kg de liant a été incorporé dans le cas des formulations étudiées dans la première étape. La maniabilité des mélanges a ensuite été évaluée. Par la suite, les squelettes granulaires des formulations de béton présentant des valeurs moyennes à élevées d'ouvrabilité, de capacité de passage et de stabilité statique ont été sélectionnés pour réaliser l'étude de la deuxième étape (SG-2).

##### **4.6.5.2. 2<sup>e</sup> étape: $V_P$ de 26%**

Comme le montre la Fig. 4.6, les mélanges granulaires optimisés dans la première étape (SG-2) sont utilisés pour formuler les BAP-éco avec une  $V_P$  réduite de 26%. Dans ce cas, une teneur totale en liant de  $277 \text{ kg/m}^3$ , dont  $207,75 \text{ kg/m}^3$  de GU,  $55,40 \text{ kg/m}^3$  de cendre volant (F) et  $13,85 \text{ kg/m}^3$  de fumée de silice, a été utilisée. Une teneur en superplastifiant de 900 ml/100 kg de liant a été également utilisée. Une classification basée sur l'ouvrabilité a ensuite été établie en fonction des valeurs de l'étalement, du temps de V-Funnel, du  $\Delta J$ -Ring et de la ségrégation statique. Par conséquent, les squelettes granulaires des mélanges de béton présentant des valeurs moyennes à élevées de maniabilité, de capacité de passage et de stabilité statique ont été sélectionnés pour préparer les formulations de la troisième étape (SG-3).



#### **4.6.5.3. 3<sup>e</sup> étape: $V_P$ de 24%**

Les BAP-éco formulés avec une teneur minimale en pâte de 24% ont été fabriqués en utilisant les distributions granulaires optimisés dans la deuxième étape (SG-3). Une teneur totale en liant de  $256 \text{ kg/m}^3$ , dont  $192,00 \text{ kg/m}^3$  de GU,  $51,20 \text{ kg/m}^3$  de cendres volantes (F) et  $12,80 \text{ kg/m}^3$  de fumée de silice, a été utilisée. En raison d'un volume de pâte ( $V_P$ ) très faible et, par conséquent, des frottements interarticulaires élevés, une teneur en superplastifiant plus élevée de  $1074 \text{ ml/100 kg}$  de liant a été utilisée. Les caractéristiques de maniabilité et de la résistance à la compression à 28 jours des mélanges étudiés dans cette étape ont également été évaluées.

#### **4.6.5.4. 4<sup>e</sup> étape: proposer les nouveaux modèles de distribution granulométrique**

La granulométrie des squelettes granulaires des mélanges BAP-éco avec un  $V_P$  minimum de 24% (SG-3) a été étudiée en tenant compte des dimensions morphologiques de granulas (tableau 4.2). En conséquence, de nouveaux modèles de granulométrie, ainsi que leurs modules de distribution correspondants « q » ont ensuite été proposés pour décrire avec précision la distribution granulométrique des squelettes granulaires optimisés par rapport à ceux des modèles originaux Fuller-Thomson (Fuller et Thomson, 1907) et Funk-Dinger (Funk et Dinger, 1994).

#### **4.6.5.5. 5<sup>ème</sup> étape: Validation des modèles proposés avec de nouvelles sources des granulats**

Les modèles de granulométrie optimisés ont été déterminés en utilisant les valeurs moyennes de « q » déterminées à l'étape 4. Ces valeurs de q ont été obtenues pour les mélanges BAP-éco optimisés à l'étape 3. Les valeurs « q » proposées ont ensuite été validées en utilisant de nouvelles sources de granulats pour obtenir la courbe de granulométrie idéale qui peut conduire à des caractéristiques de maniabilité plus élevées et à une résistance à la compression appropriée.

#### **4.6.6. Séquence de malaxage**

Tous les mélanges BAP-éco ont été préparés en utilisant un mélangeur à tambour rotatif. Un volume de béton de 50 L est préparé. La séquence de malaxage consiste à homogénéiser les granulats (sable+granulat grossier) pendant 90 s. Le  $\frac{1}{3}$  de l'eau de malaxage avec l'agent

entraîneur d'air (AEA) sont introduits et mélangés pendant 60 s. Le liant est ensuite ajouté et mélangé pendant 30 s. Les deuxièmes  $\frac{1}{3}$  de l'eau de mélange et le superplastifiant sont ajoutés et mélangés pendant 60 s supplémentaires. Le  $\frac{1}{3}$  d'eau restant est ensuite ajouté et le malaxage est repris pendant 90 s supplémentaires. Après 120 s de repos, le mélange est mélangé pendant 180 s supplémentaires. Immédiatement après le mélange, la teneur en air, l'étalement (ASTM C1611M, 2014), le J-Ring (ASTM C1621, 2014), le V-Funnel (ACI committee 318, 2011) et la résistance à la ségrégation du tamis (The European Project Group, 2005) ont été effectués pour évaluer respectivement la fluidité, la capacité de passage et la stabilité statique des mélanges étudiés.

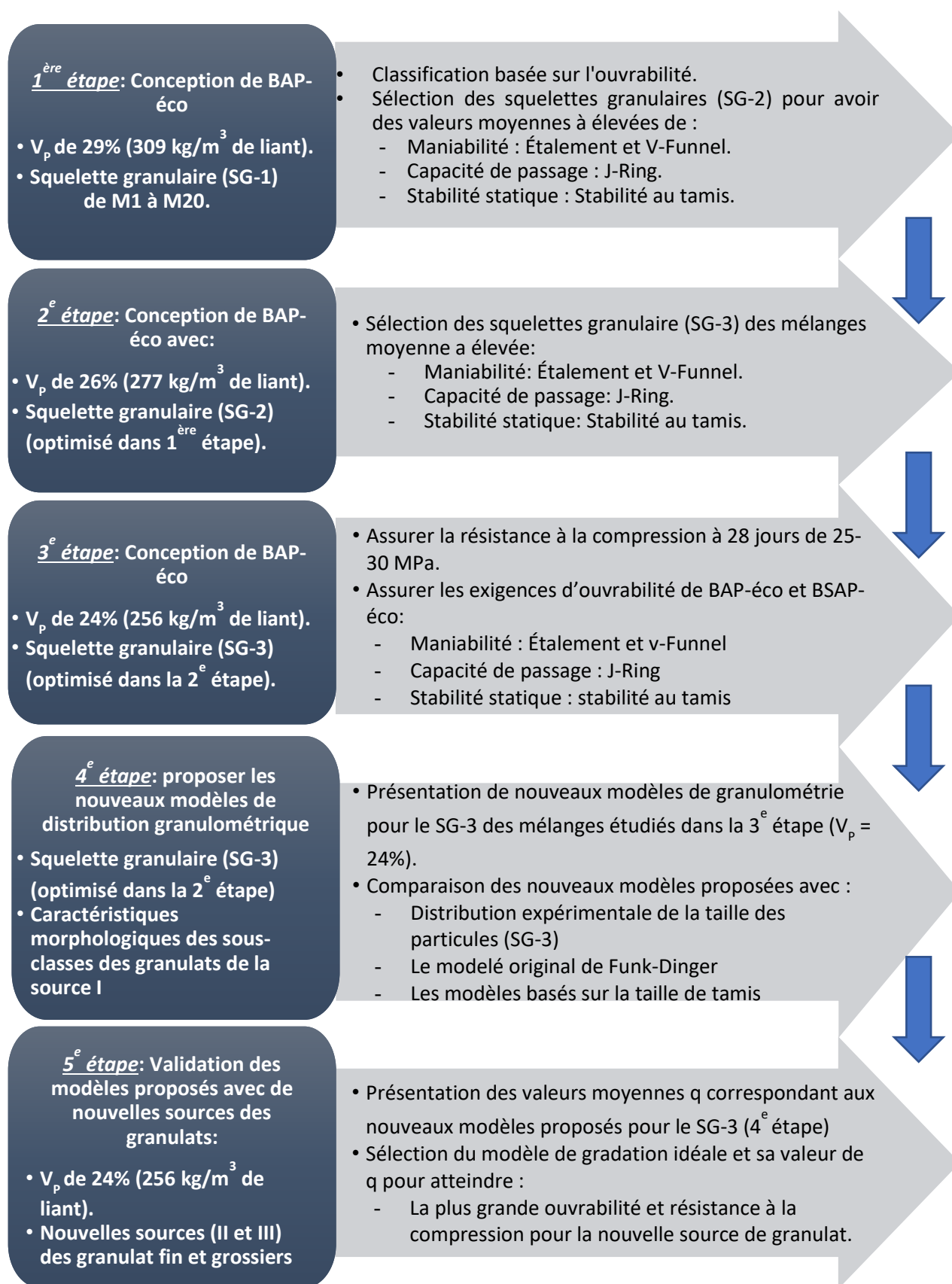


Figure 4.6 La procédure expérimentale pour déterminer la courbe de granulométrie idéale pour les BAP-éco et BSAP-éco.



## CHAPITRE 5 NOUVEAUX MODÈLES DE DISTRIBUTION GRANULOMÉTRIQUE PROPOSÉS

Comme on peut l'observer sur la Fig. 4.5, la précision du modèle théorique de Fuller-Thomson est fonction de la fraction de sable. Par conséquent, différents modèles de granulométrie théorique sont examinés dans cette étude pour évaluer leur adéquation dans la prévision des distributions expérimentales de la taille des particules des mélanges granulaires M1 à M20. Ces modèles sont présentés en deux différents groupes A et B. Il convient de mentionner que les paramètres «  $d_{\min}$  » et «  $d_{\max}$  » dans les modèles de granulométrie théorique (A et B) sont respectivement remplacés par les valeurs minimales et maximales de  $MD_{\min}$  et  $MD_{\max}$  (tableaux 4.1 à 4.4) de toutes les sous-classes d'un mélange donné. De plus, le paramètre «  $d$  » dans les modèles du groupe A représente la taille des tamis standard. Par ailleurs, ce paramètre réfère au diamètre moyen réel des particules de chaque sous-classe de granulat déterminé à partir des analyses morphologiques (c.-à-d.  $D_{\text{avg}}$  dans les tableaux 4.1 à 4.4) dans les modèles du groupe B. En conséquence, les distributions granulométriques expérimentales sont examinées en utilisant à la fois les tamis standard et les tailles morphologiques réelles et comparées aux modèles théoriques des groupes A et B. Les spécifications des courbes de granulométrie traditionnelles et nouvelles proposées sont présentées comme suit:

### 5.1. Modèles A1 et B1: modèle de Fuller-Thomson (Fuller et Thomson, 1907)

$$P(d) = \frac{d^q - (d_{\min} = 0)^q}{d_{\max}^q - (d_{\min} = 0)^q} \times 100\% = \left( \frac{d}{d_{\max}} \right)^q \times 100\% \quad \text{Équation 5.1}$$

Où les valeurs du paramètre  $q$  sont 0,400, 0,425, 0,450, 0,475 et 0,500, alors que  $d_{\min}$  et  $d_{\max}$  sont respectivement fixés à 0 et 20 mm. Ces valeurs ont été initialement utilisées pour formuler les mélanges granulaires en utilisant le modèle de Fuller-Thomson (Fuller et Thomson, 1907).

## **5.2. A2 et B2: modèles Funk-Dinger (Funk et Dinger, 1994) avec $d_{\min}$ et $d_{\max}$ modifiés**

$$P(d) = \frac{d^q - d_{\min}^q}{d_{\max}^q - d_{\min}^q} \times 100\% \quad \text{Équation 5.2}$$

Où les valeurs  $q$  sont 0,400, 0,425, 0,450, 0,475 et 0,500. En revanche, les valeurs de  $MD_{\min}$  et  $MD_{\max}$  de toutes les sous-classes d'un granulat donné, obtenus par des analyses morphologiques (tableaux 4.1 à 4.4), sont respectivement utilisés comme valeurs  $d_{\min}$  et  $d_{\max}$ .

## **5.3. A3 et B3: Nouveaux modèles Funk-Dinger (Funk et Dinger, 1994) avec $d_{\min}$ et $d_{\max}$ modifiés**

$$P(d) = \frac{d^q - d_{\min}^q}{d_{\max}^q - d_{\min}^q} \times 100\% \quad \text{Équation 5.3}$$

Comme dans les modèles A2 et B2, les valeurs  $d_{\min}$  et  $d_{\max}$  des modèles A3 et B3 sont remplacées par les diamètres morphologiques réels, qui correspondent respectivement aux valeurs minimales de  $MD_{\min}$  et maximales de  $MD_{\max}$  de toutes les sous-classes du mélange de granulat étudié. D'un autre côté, pour les différents mélanges granulaires M1 à M20, de nouvelles valeurs du paramètre  $q$  dans le modèle de Funk-Dinger (Funk et Dinger, 1994) sont obtenues en utilisant le solveur de Microsoft Excel. GRG non linéaire pour s'approcher de la courbe de granulométrie expérimentale correspondante ayant l'erreur la plus faible.

Un nouveau modèle de courbe de granulométrie peut être développé en considérant deux contraintes, comme suit: lorsque la taille des particules " $d$ " est égale à la taille minimale ( $d_{\min}$ ) et maximale ( $d_{\max}$ ), la fraction solide totale plus fine que " $d$ " (c'est-à-dire,  $P(d)$ ) doit

être de 0% et 100%, respectivement. En conséquence, deux nouveaux modèles sont proposés dans cette étude pour prédire les distributions expérimentales de la taille des particules, comme présenté dans les sections 5.4 et 5.5:

#### 5.4. Les premiers nouveaux modèles proposés: A4 et B4

$$P(d) = \left( \frac{d - d_{\min}}{d_{\max} - d_{\min}} \right)^q \times 100\% \quad \text{Équation 5.4}$$

À l'instar des modèles A2-3 et B2-3, les valeurs modifiées de  $d_{\min}$  et  $d_{\max}$ , obtenues par des analyses morphologiques (minimum de  $MD_{\min}$  et maximum de valeurs de  $MD_{\max}$  dans les tableaux 4.1 à 4.4), sont utilisées dans ce modèle. Pour différents mélanges de granulat et distributions granulométriques, les valeurs du paramètre  $q$  des modèles A4 et B4 sont obtenues par un solveur Microsoft Excel non linéaire GRG pour prédire les courbes de granulométrie expérimentales correspondantes.

#### 5.5. Les nouveaux modèles proposés: A5 et B5

$$P(d) = \left[ \frac{\ln(d) - \ln(d_{\min})}{\ln(d_{\max}) - \ln(d_{\min})} \right]^q \times 100\% \quad \text{Équation 5.5}$$

Les valeurs minimales de  $MD_{\min}$  et maximales de  $MD_{\max}$  de toutes les sous-classes d'un mélange de granulat donné, obtenues par analyses morphologiques (tableaux 4.1 à 4.4), sont utilisées respectivement comme valeurs  $d_{\min}$  et  $d_{\max}$ . De plus, les valeurs du paramètre  $q$  des modèles A5 et B5 sont obtenues par un solveur Microsoft Excel non linéaire GRG pour prédire les distributions expérimentales correspondantes de la taille des particules.





## CHAPITRE 6 ANALYSE ET DISCUSSIONS DES RÉSULTATS

### 6.1. Relation entre plusieurs caractéristiques morphologiques

Les résultats des analyses d'images montrent que les caractéristiques morphologiques combinées des différents mélanges granulaires M1 à M20, présentées dans le tableau 4.5, sont très bien corrélées les unes aux autres. Comme on peut l'observer sur la Fig.6.1, pour un diamètre moyen donné ( $\overline{D_{avg}}$ ), les mélanges granulaires avec un rapport d'aspect moyen plus élevé ( $\overline{AR}$ ) présentent une rugosité plus élevée ( $\overline{R}$ ) ou moins de circularité ( $\overline{C}$ ), avec une relation linéaire. La connaissance de ( $\overline{D_{avg}}$ ), et ( $\overline{AR}$ ) qui sont des mesures relativement simples peut être utilisée pour évaluer le rapport rugosité / circularité du granulat.

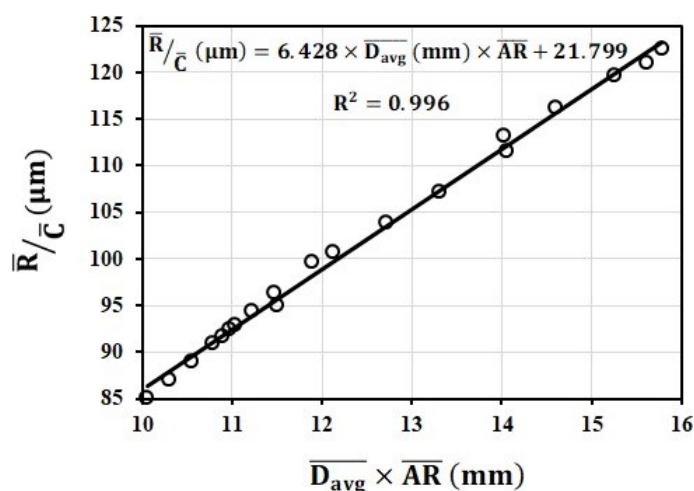


Figure 6.1 Corrélation entre les caractéristiques morphologiques des mélanges granulaires étudiés:  $\overline{R}/\overline{C}$  par rapport à  $\overline{D_{avg}} \times \overline{AR}$ .

### 6.2. Comparaison entre les modèles de distribution granulométrique traditionnels et les nouveaux modèles proposés

Les résultats des valeurs de  $q$  obtenues pour différents modèles de distribution granulométrique des groupes A et B (équations 5.1 à 5.5) sont respectivement présentés dans les tableaux 6.1 et 6.2. Comme on peut le constater, l'application de différents modèles de granulométrie, en utilisant les valeurs nominales et réelles  $d_{min}$  et  $d_{max}$ , ainsi que les tailles de tamis standard ou

les diamètres morphologiques moyens  $D_{avg}$  comme tailles de particules «d», ont abouti à des valeurs du paramètre  $q$  des différentes distributions.

La précision des modèles appliqués (A1-A5 et B1-B5) pour prédire la distribution granulométrique de différents mélanges granulaires M1 à M20 est évaluée en termes des valeurs de  $R^2$  et de l'erreur quadratique moyenne (EQM) des corrélations établies. Les valeurs EQM ont été calculées comme suit:

$$EQM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [P_{Théorique}(d_i) - P_{Expérimental}(d_i)]^2}{n}} \quad \text{Équation 6.1}$$

Où  $P_{Théorique}(d_i)$  et  $P_{Expérimental}(d_i)$  sont la fraction volumétrique de particules plus fines que la sous-classe "i" de taille  $d_i$  obtenues respectivement par les modèles théoriques A1-A5 et B1-B5 et les distributions expérimentales des particules des mélanges granulaires M1 à M20, alors que  $n$  est le nombre total des sous-classes de granulats. La granulométrie expérimentale du mélange M3 et les distributions théoriques de la taille des particules obtenues à l'aide des modèles des groupes A et B (Équations 5.1 à 5.5) sont présentés dans les Figs. 6.2 et 6.3. Comme on peut le constater, les modèles A3, A5, B3 et B5 ont entraîné moins d'erreurs de prédiction (EQM) et un  $R^2$  plus élevé par rapport aux autres modèles de granulométrie pour le mélange granulaire M3.

Pour tous les mélanges granulaires étudiés (M1 à M20), la précision des modèles appliqués (A2-A5 et B2-B5) est comparée à celle des modèles Fuller-Thomson (A1 et B1), qui était initialement utilisés pour formuler les mélanges granulaires. Comme on peut le voir sur la Fig. 6.4, les nouveaux modèles logarithmiques proposés (c'est-à-dire A5 et B5) peuvent fournir les coefficients  $R^2$  les plus élevés et les erreurs EQM minimales et, par conséquent, permettre des prévisions plus précises des distributions expérimentales de la taille des particules par rapport aux autres modèles (c'est-à-dire A1-A4 et B1-B4). D'un autre côté, parmi tous les modèles dérivés de Funk-Dinger (Funk et Dinger, 1994), les nouveaux modèles A3 et B3 considérant les valeurs modifiées de  $d_{min}$  et  $d_{max}$  ont montré la plus grande précision. Par conséquent, on peut conclure que l'utilisation des diamètres morphologiques réels ( $d_{min}$  et  $d_{max}$ ) des particules, au lieu des plages nominales ou des tailles de tamis standard, peut améliorer considérablement la précision de la prédiction dans les granulométris expérimentales.

Tableau 6.1 Les valeurs des  $q$  obtenues en utilisant les modèles théoriques du groupe A et la taille des particules «  $d$  » comme tailles de tamis standard.

Sous-classe de granulat No.	Gamme de tailles de tamis (mm)	Source principale de la classe de granulat	$MD_{\max}$ (mm) (Éq. 4.1)	$MD_{\min}$ (mm) – (Éq. 4.2)	$D_{\text{avg}}$ (mm) – (Éq. 4.3)
1	20 – 28	CAIII2	$d_{\max} = 31,495$	25,210	28,353
2	20 – 28	CAIII3	29,145	24,378	26,762
3	14 – 20	CAIII1	34,710	17,313	26,012
4	14 – 20	CAIII3	26,150	19,409	22,779
5	14 – 20	CAIII2	23,239	18,560	20,900
6	5 – 10	CAIII3	21,294	8,604	14,949
7	10 – 14	CAIII2	19,326	10,160	14,743
8	10 – 14	CAIII3	17,649	11,799	14,724
9	10 – 14	CAIII1	14,923	12,717	13,820
10	5 – 10	CAIII1	11,722	9,224	10,473
11	5 – 10	CAIII2	11,536	6,013	8,775
12	5 – 10	Sable III	9,141	7,681	8,411
13	2,5 – 5	CAIII1	10,885	4,814	7,849
14	2,5 – 5	CAIII2	7,535	4,738	6,136
15	2,5 – 5	Sable III	5,084	4,343	4,714
16	1,25 – 2,5	CAIII1	4,466	2,354	3,410
17	1,25 – 2,5	CAIII2	3,121	2,095	2,608
18	1,25 – 2,5	Sable III	2,018	1,684	1,851
19	0,630 – 1,250	Sable III	1,179	0,946	1,062
20	0,315 – 0,630	Sable III	0,594	0,448	0,521
21	0,160 – 0,315	Sable III	0,370	0,245	0,307
22	0,080 – 0,160	Sable III	0,203	$d_{\min} = 0,133$	0,168

Tableau 6.2 Les valeurs des  $q$  obtenues par les modèles théoriques du groupe B en utilisant la taille des particules « $d$ » comme la taille morphologique moyenne de l'agrégat (valeurs  $D_{avg}$  dans le tableau 4.1).

Mélange granulaire No.	S/G	Module de distribution q									
		Modèle B1 (Éq. 5.1)		Modèle B2 (Éq. 5.2)		Modèle B3 (Éq. 5.3)		Modèle B4 (Éq. 5.4)		Modèle B5 (Éq. 5.5)	
		d <sub>min</sub>	d <sub>max</sub>	d <sub>min</sub>	d <sub>max</sub>	d <sub>min</sub>	d <sub>max</sub>	d <sub>min</sub>	d <sub>max</sub>	d <sub>min</sub>	d <sub>max</sub>
		0	20	0,021	27,840	0,021	27,840	0,021	27,840	0,021	27,840
M1	0,450					0,5126		0,5358		3,3567	
M2	0,500					0,4571		0,4887		3,0116	
M3	0,550	0,4000		0,4000		0,3886		0,4340		2,6186	
M4	0,600					0,3377		0,3956		2,3449	
M5	0,450					0,5215		0,5434		3,4106	
M6	0,500					0,4504		0,4833		2,9738	
M7	0,550	0,4250		0,4250		0,3862		0,4322		2,6062	
M8	0,600					0,3438		0,4000		2,3737	
M9	0,450					0,5180		0,5404		3,3889	
M10	0,500					0,4476		0,4810		2,9577	
M11	0,550	0,4500		0,4500		0,3897		0,4348		2,6238	
M12	0,600					0,3499		0,4044		2,4033	
M13	0,450					0,5147		0,5376		3,3692	
M14	0,500					0,4448		0,4788		2,9419	
M15	0,550	0,4750		0,4750		0,3964		0,4399		2,6587	
M16	0,600					0,3562		0,4090		2,4337	
M17	0,450					0,5114		0,5348		3,3489	
M18	0,500					0,4452		0,4792		2,9444	
M19	0,550	0,5000		0,5000		0,4032		0,4452		2,6946	
M20	0,600					0,3626		0,4136		2,4649	

\* $d$ ,  $d_{min}$ , et  $d_{max}$  sont en mm

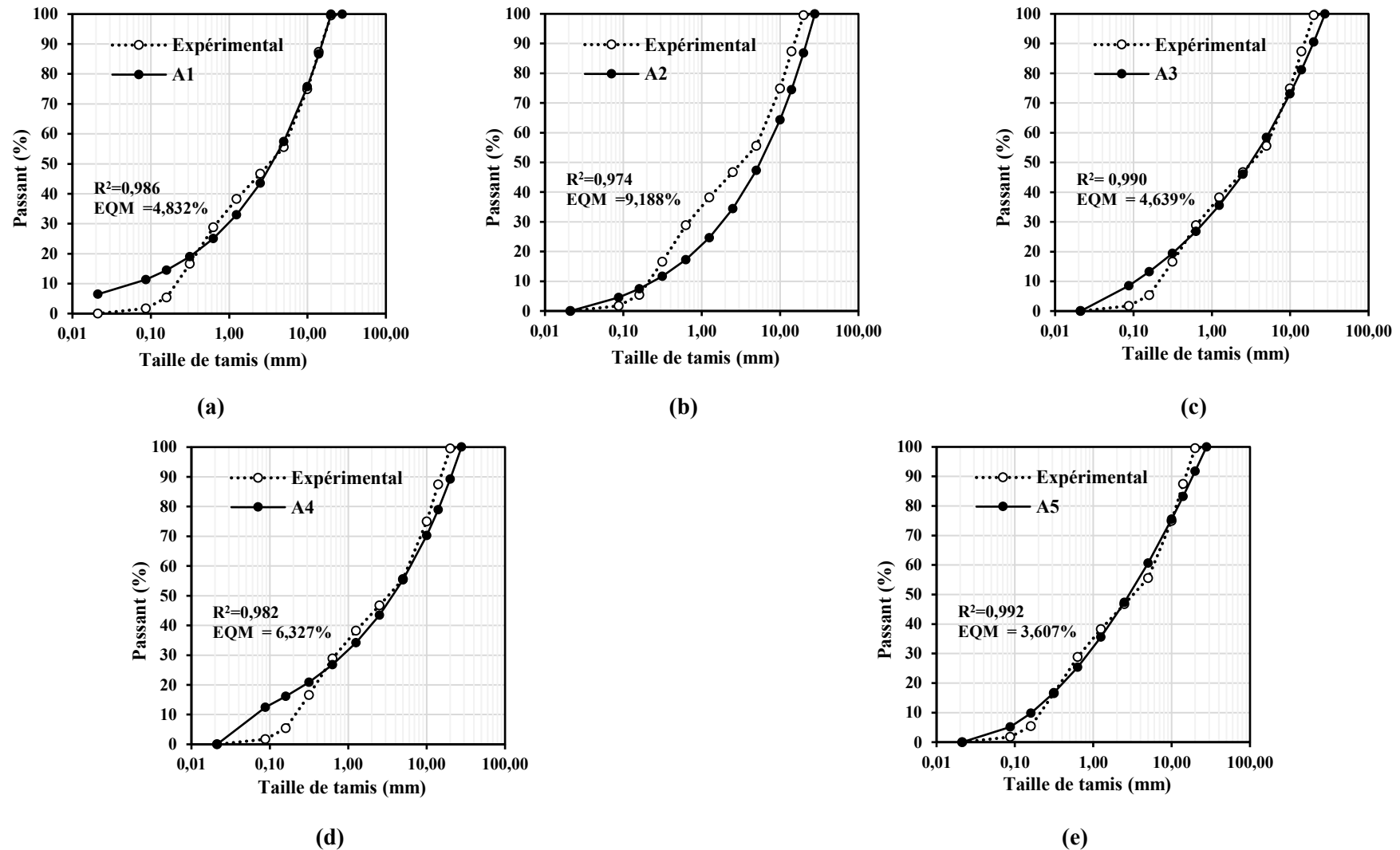


Figure 6.2 Comparaison entre les courbes de granulométrie expérimentales et théoriques en utilisant des modèles du groupe A (c.-à-d. «D» comme tailles de tamis standard), y compris (a) A1, (b) A2, (c) A3, (d) A4 et (e) A5 pour le mélange granulaire M3.

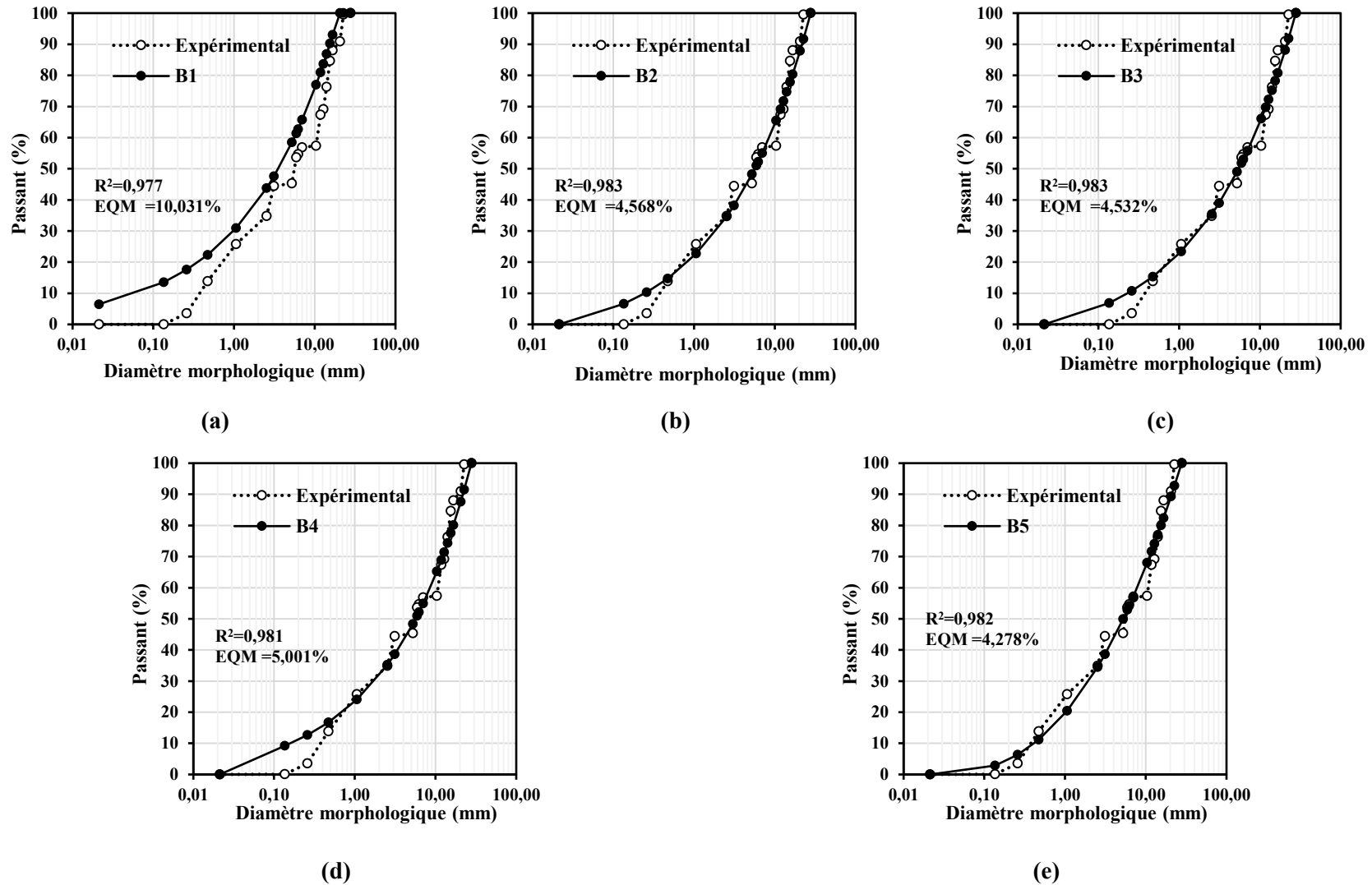


Figure 6.3 Comparaison entre les courbes de granulométrie expérimentales et théoriques en utilisant des modèles du groupe B (c.-à-d. «D» comme diamètres morphologiques  $D_{avg}$ ), y compris (a) B1, (b) B2, (c) B3, (d) B4 et (e) B5 pour le mélange granulaire M3.

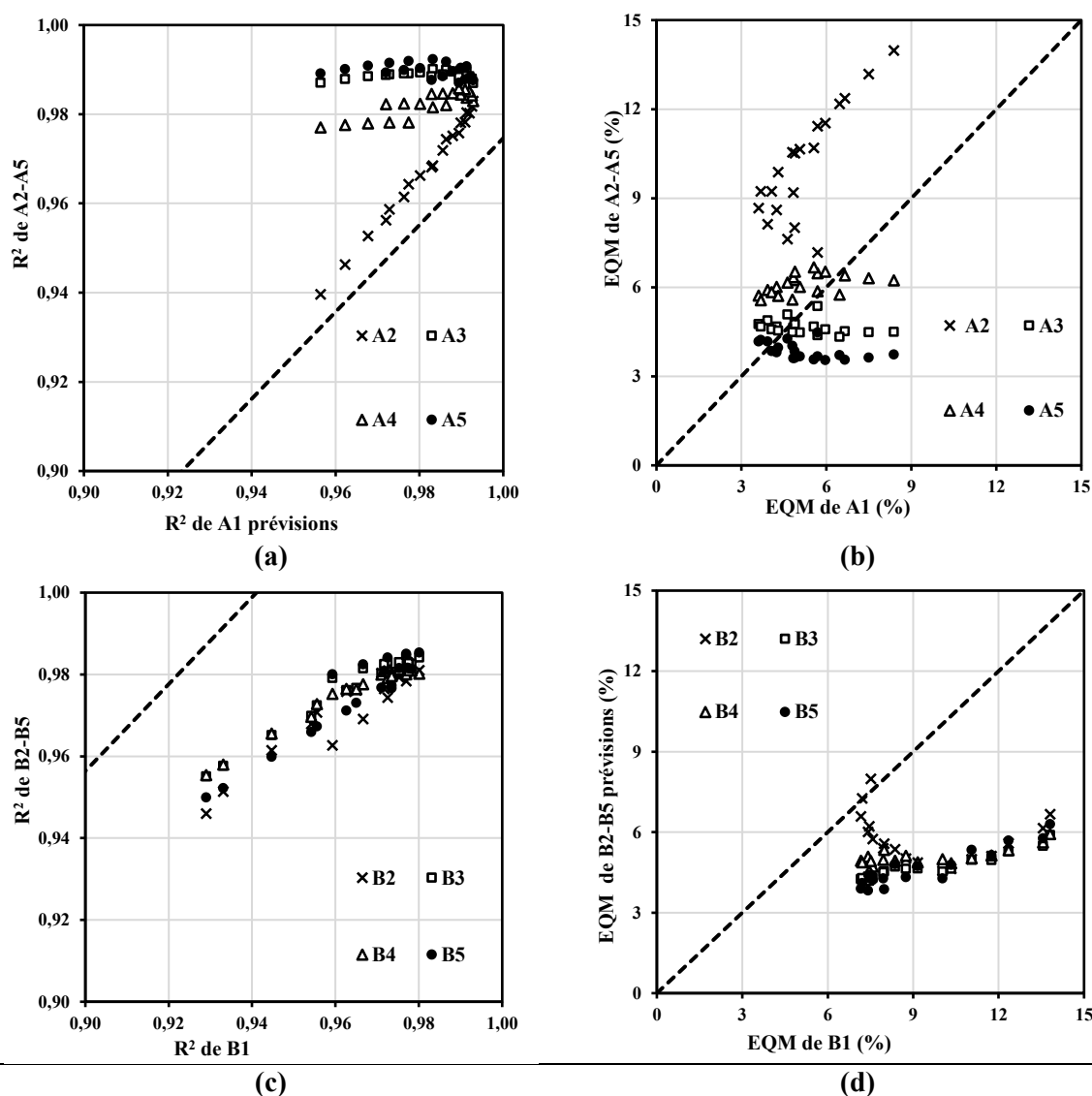


Figure 6.4 Comparaison entre la précision des modèles de granulométrie étudiés avec les modèles Fuller-Thomson (Fuller et Thomson, 1907) (A1 et B1): (a)  $R^2$  et (b) EQM des prédictions des modèles A2-A5 versus  $R^2$  et EQM des prédictions du modèle A1, ainsi que (c)  $R^2$  et (d) EQM des prédictions des modèles B2-B5 versus  $R^2$  et EQM des prédictions du modèle B1.

Comme on peut l'observer aux Fig. 6.4-b et d, en utilisant les diamètres morphologiques moyens des granulates au lieu des tailles de tamis standard, le paramètre « d » a conduit à des valeurs EQM inférieures et, par conséquent, à une plus grande précision des modèles du groupe B (4% à 9% pour B2-B5) par rapport au groupe A (4% à 14% pour A2-A5). Cependant, la détermination des diamètres morphologiques de toutes les sous-classes de granulates fins et grossiers dans les chantiers n'est généralement pas effectuée en raison de sa complexité. Par conséquent, il peut être utile d'estimer les valeurs de  $q$  par utilise les tailles morphologiques des

granulats (Obtenues à l'aide de modèles du groupe B) en fonction des valeurs de  $q$  estimées à l'aide des diamètres des tailles des tamis (c'est-à-dire les modèles du groupe A). Comme présenté aux Figs. 6.5-a et b, les valeurs du paramètre  $q$  obtenues par les modèles B3 et B5 sont corrélées à celles estimées en utilisant les modèles A3 et B3. Comme on peut le constater, les valeurs du paramètre  $q$  obtenues dans le cas des modèles du groupe B sont supérieures à celles estimées dans le cas des modèles du groupe A (tailles des tamis standard), avec de très bonnes corrélations linéaires. Ces corrélations peuvent être utilisées dans l'industrie pour assurer de meilleures prévisions des distributions granulométriques.

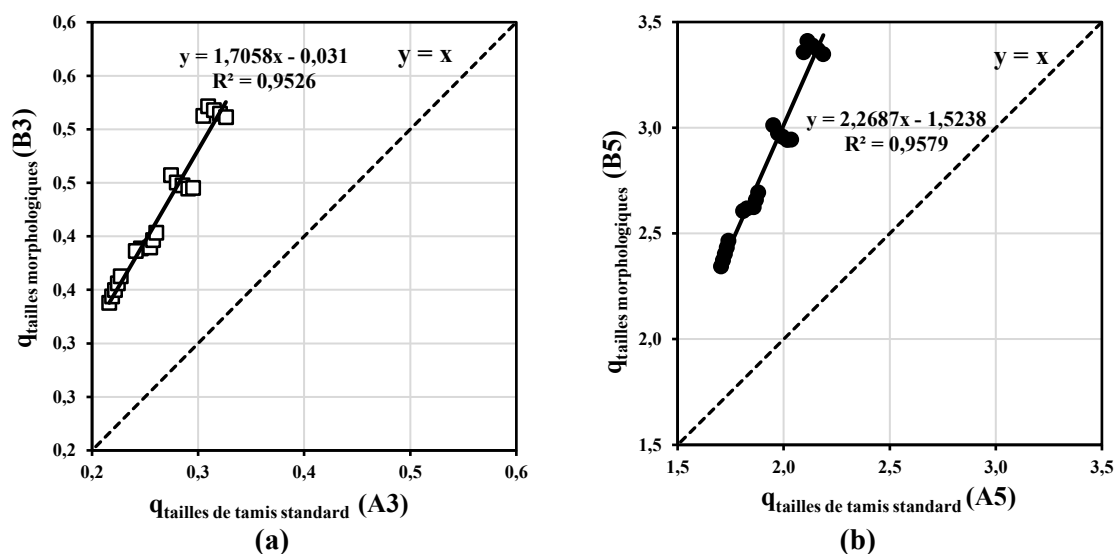


Figure 6.5 Les valeurs des  $q$  obtenues par les modèles (a) B3 et (b) B5 (valeurs de tailles morphologiques) par rapport à celles obtenues par les modèles A3 et A5 (valeurs de tailles de tamis standard).

### 6.3. Validation des modèles de granulométrie proposés à l'aide de trois sources de granulats II, III et IV

Les modèles proposés les plus précis (c'est-à-dire les modèles logarithmiques A5 et B5), les modèles basés sur Funk-Dinger (Funk et Dinger, 1994) modifiés (A3 et B3) et les valeurs correspondants du paramètre  $q$  dans les tableaux 6.1 et 6.2 pour la formulation M3 (source I) est appliqué pour trois autres sources de granulats II, III et IV. Par conséquent, les valeurs  $d_{\min}$  et  $d_{\max}$  dans les modèles A3, B3, A5 et B5 (équations 5.3 et 5.5) sont remplacées par les diamètres morphologiques réels, correspondant aux valeurs minimums de  $MD_{\min}$  et maximum de  $MD_{\max}$  de toutes les sous-classes des sources II, III et IV (tableaux 4.2 à 4.4). D'autre part, les tailles des tamis normalisés et les diamètres morphologiques moyens réels ( $D_{\text{avg}}$  dans les



tableaux 2.4-4.4) sont utilisés dans les équations. 5.3 et 5.5 comme taille des particules « d » pour les sources de granulats II, III et IV dans les modèles des groupes A et B, respectivement.

Différents solveurs Microsoft Excel non linéaires GRG ont été développés pour estimer les fractions volumétriques de différentes classes de granulats de sources II, III et IV en utilisant les valeurs du paramètre  $q$  des modèles optimisés A3, A5, B3 et B5 obtenus pour le mélange M3 (tableaux 6.3 et 6.4). Ces solveurs considèrent la distribution granulométrique et les mesures morphologiques de toutes les sous-classes de granulats des trois nouvelles sources de granulat. Il convient de mentionner que le rapport volumétrique sable/total granulats (S/G) pour les sources II et III est fixé à 0,55, comme pour le mélange M3. Cependant, pour les mélanges granulaires correspondant à la source IV, le rapport S/G n'est pas fixé à une valeur spécifique en raison de la présence d'une seule classe de granulat grossiers (CAIV1). Par conséquent, les fractions de sable des mélanges granulaires de la source IV sont déterminées à l'aide du solveur. Les caractéristiques morphologiques moyennes de ces mélanges granulaires sont évaluées en déterminant les propriétés de forme des différentes sous-classes correspondantes (tableaux 4.2-4.4) et des équations 4.3 à 4.7. Les proportions obtenues de différentes fractions de granulat des sources II, III et IV, ainsi que leurs caractéristiques morphologiques moyennes sont respectivement présentées dans les tableaux 6.3-6.5. En revanche, les caractéristiques morphologiques et les distributions granulométriques des mélanges granulaires des sources II, III et IV, correspondant aux proportions obtenues avec les modèles A3 et B3, sont comparées à celles obtenues avec les modèles A5 et B5 et présentées sur les Figs. 6.6 et 6.7.

*Tableau 6.3 Proportions volumétriques et caractéristiques morphologiques moyennes des squelettes granulaires de la source II optimisées par les modèles A3, A5, B3 et B5.*

Mélange granulaire No.	Modèle de granulométrie	q	d	d <sub>min</sub> (mm)	d <sub>max</sub> (mm)	Fraction volumétrique					Caractéristiques morphologiques moyennes			
						Sable II (S/G)	CAIII1	CAIII2	CAIII3	CAIII4	$\overline{D}_{avg}$ (mm) (Éqs. 4.3 et 4.7)	$\overline{AR}$ (Éqs. 4.4 et 4.7)	$\overline{C}$ (Éqs. 4.5 et 4.7)	$\overline{R}$ (μm) (Éqs. 4.6 et 4.7)
M-II-A3	A3 (Éq. 5.3)	0,2461	Diamètre du tamis			0,550	0,128	-	-	0,322	8,733	1,443	0,672	76
M-II-A5	A5 (Éq. 5.5)	1,8274	Diamètre morphologique	0,032	32,063	0,550	0,151	-	-	0,299	8,515	1,447	0,672	74
M-II-B3	B3 (Éq. 5.3)	0,3886	Diamètre du tamis			0,550	0,085	0,002	0,136	0,227	8,335	1,458	0,671	73
M-II-B5	B5 (Éq. 5.5)	2,6186	Diamètre morphologique			0,550	0,093	0,005	0,140	0,212	8,209	1,460	0,671	71

*Tableau 6.4 Proportions volumétriques et caractéristiques morphologiques moyennes des squelettes granulaires de la source III optimisées par les modèles A3, A5, B3 et B5.*

Mélange granulaire No.	Modèle de gradation	q	d	d <sub>min</sub> (mm)	d <sub>max</sub> (mm)	Fraction volumétrique				Caractéristiques morphologiques moyennes			
						Sable III (S/G)	CAIII1	CAIII2	CAIII3	$\overline{D}_{avg}$ (mm) (Éqs. 4.3 et 4.7)	$\overline{AR}$ (Éqs. 4.4 et 4.7)	$\overline{C}$ (Éqs. 4.5 et 4.7)	$\overline{R}$ (μm) (Éqs. 4.6 et 4.7)
M-III-A3	A3 (Éq. 5.3)	0,2461	Diamètre du tamis			0,550	0,094	0,054	0,303	9,361	1,383	0,673	69
M-III-A5	A5 (Éq. 5.5)	1,8274	Diamètre morphologique	0,133	31,495	0,550	0,049	0,099	0,302	9,497	1,401	0,669	70
M-III-B3	B3 (Éq. 5.3)	0,3886	Diamètre du tamis			0,550	0,084	0,145	0,221	8,664	1,425	0,663	67
M-III-B5	B5 (Éq. 5.5)	2,6186	Diamètre morphologique			0,550	0,041	0,155	0,254	9,074	1,426	0,663	70

Tableau 6.5 Proportions volumétriques et caractéristiques morphologiques moyennes des squelettes granulaires de la source IV optimisées à l'aide de différents modèles A3, A5, B3 et B5.

Mélange granulaire No.	Modèle de granulométrie	q	d	d <sub>min</sub> (mm)	d <sub>max</sub> (mm)	Fraction volumétrique		Caractéristiques morphologiques moyennes			
						Sable IV (S/G)	CAIV1	$\overline{D}_{avg}$ (mm) (Éqs. 4.3 et 4.7)	$\overline{AR}$ (Éqs. 4.4 et 4.7)	$\overline{C}$ (Éqs. 4.5 et 4.7)	$\overline{R}$ (μm) Éqs. 4.6 et 4.7)
M-IV-A3	A3 (Éq. 5.3)	0,2461	Diamètre du tamis			0,535	0,465	6,558	1,359	0,646	56
M-IV-A5	A5 (Éq. 5.5)	1,8274	Diamètre morphologique			0,509	0,491	6,904	1,361	0,656	58
M-IV-B3	B3 (Éq. 5.3)	0,3886	Diamètre du tamis	0,043	19,447	0,594	0,406	5,865	1,355	0,622	50
M-IV-B5	B5 (Éq. 5.5)	2,6186	Diamètre morphologique			0,557	0,443	6,313	1,358	0,637	53

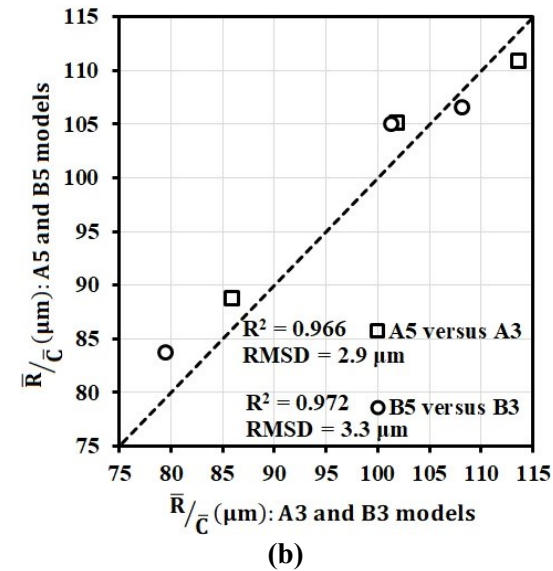
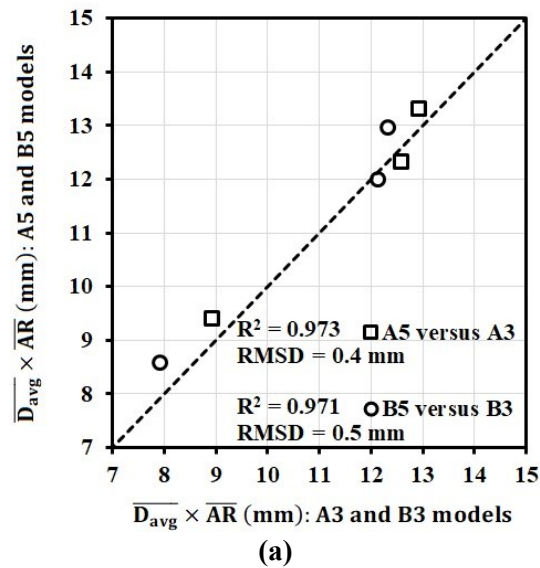


Figure 6.6 Comparaisons entre les caractéristiques morphologiques des mélanges granulaires II, III et IV obtenues en utilisant A3 et B3 et celles obtenues en utilisant les modèles A5 et B5, (a)  $\overline{D}_{avg} \times \overline{AR}$  et (b)  $\overline{R}/\overline{C}$ .

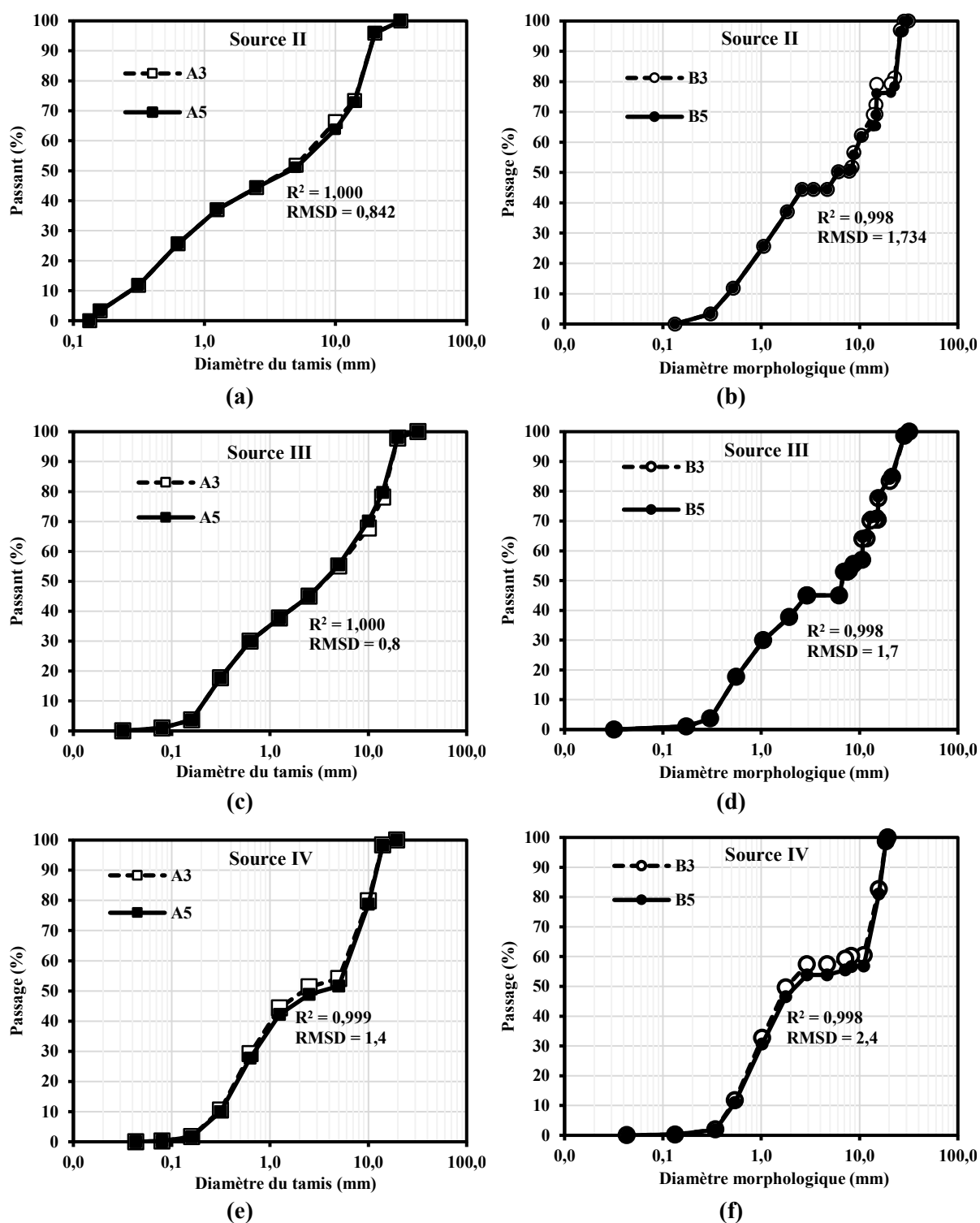


Figure 6.7 Comparaisons entre les distributions granulométriques des mélanges formulés avec les sources de granulat (a, b) II, (c, d) III et (e, f) IV, optimisées par (a, c, e) modèles A3 et A5, et (b, d, f) modèles B3 et B5.

Il convient de mentionner que les valeurs de EQM, illustrées sur les Figs. 6.6 et 6.7 correspondent aux différences quadratiques moyennes entre les valeurs obtenues par deux modèles différents (A3 et A5 ou B3 et B5). Ces valeurs peuvent être calculées d'une manière similaire à celles calculées en utilisant l'équation 6.1.

Comme on peut l'observer dans les tableaux 6.3-6.5, l'utilisation de différents modèles et des valeurs du paramètre  $q$  correspondant à un même mélange granulaire M3 a conduit à des dosages différents des trois sources de granulats. Cependant, comme le montrent les Figs. 6.6 et 6.7, ces différents dosages présentent des caractéristiques morphologiques (Fig. 9) et des distributions granulométriques comparables (Fig. 6.7). Dans le cas des caractéristiques morphologiques combinées  $\overline{D}_{avg} \times \overline{AR}$ , des coefficients de corrélation ( $R^2$ ) de 0,97 et des valeurs EQM de 0,4-0,5 mm ont été obtenus pour les mélanges granulaires optimisés à l'aide des modèles A3/A5 et B3/B5 pour les différentes sources de granulat II, III et IV. Dans le cas de  $\overline{R}/\overline{C}$ , ces valeurs étaient respectivement 0,97 et 2,9-3,3  $\mu\text{m}$ . D'autre part, comme on peut l'observer sur la Fig. 6.7, l'utilisation de modèles proposés A3/A5 et B3/B5 a abouti à des distributions granulaires très similaires avec des valeurs  $R^2$  élevées de plus de 0,998 et des valeurs EQM faibles de 0,6% à 2,4 %. De plus, la comparaison entre les distributions granulométriques des différentes sources de granulats a montré que l'augmentation du nombre de classes de granulat 2 de la source IV à 5 de la source II peut améliorer la précision des modèles de granulométrie en diminuant les valeurs EQM de 1,4 % et 2,4% à 0,8% et 0,6% respectivement pour les modèles de granulométrie A3/A5 et B3/B5. Cependant, afin de sélectionner les proportions optimaux des granulats (tableaux 6.3-6.5), d'autres études seront nécessaires pour évaluer l'ouvrabilité et les performances mécaniques des mélanges de béton contenant les mélanges granulaires optimisés.

## 6.4. Approche d'optimisation et dosage des mélanges

Les propriétés d'ouvrabilité et les résistances à la compression, ainsi que les classifications basées sur l'ouvrabilité des mélanges BAP-éco étudiés avec différents volumes de pâte et de liant sont discuté dans cette section (Fig. 4.6).

### 6.4.1. Caractéristiques d'ouvrabilité et les résistances à la compression ( $f'_{c-28d}$ ) des BAP-éco proportionnés avec un volume $V_P$ de 29%

Les dosages de mélange, les résultats d'ouvrabilité et des résistances à la compression ( $f'_{c-28d}$ ) des BAP-éco étudiés contenant un volume de pâte ( $V_P$ ) de 29% de correspondant à la 1<sup>ère</sup> étape de la procédure expérimentale (Fig. 4.6) sont résumés dans le tableau 6.6. Comme on peut l'observer, tous les mélanges étudiés ont montré des valeurs de  $f'_{c-28d}$  comprises entre 28,3 et

34,7 MPa. Ces valeurs sont supérieures à la valeur cible de 25 MPa exigée pour les applications résidentielles.

La capacité de remplissage du BAP est définie comme sa capacité à s'écouler à travers des espaces étroits entre les obstacles (barres d'armature et couverture de béton), tout en maintenant l'homogénéité des granulats grossiers dans le mortier en suspension (Hosseinpoor et al., 2017). La ségrégation des granulats grossiers peut affecter négativement les performances mécaniques et la durabilité de l'élément en béton coulé. En raison de sa fluidité plus élevée, le risque de ségrégation statique est plus élevé dans le BAP que dans le cas du béton conventionnel. Par conséquent, la performance d'écoulement (c'est-à-dire la capacité de remplissage) et la stabilité statique des mélanges étudiés doivent être prises en compte dans les évaluations de l'ouvrabilité.

Afin de classer les mélanges étudiés en fonction de leur niveau d'ouvrabilité, trois différentes gammes d'écoulement (étalement), de capacité de passage (J-Ring) et de caractéristiques de stabilité statique, correspondant à des ouvrabilités faible, moyenne et élevée sont définies (tableau 6.7). Par la suite, les caractéristiques de fluidité, de capacité de passage et de stabilité statique des formulations de béton étudiées sont corrélées les unes aux autres pour établir les classifications basées sur l'ouvrabilité (Fig. 6.8). En conséquence, les formulations de béton étudiés peuvent être classés en deux niveaux différents, y compris l'ouvrabilité « faible » et « moyenne à élevée », indiquées respectivement par les zones rouge et verte sur la Fig. 6.8.

Selon les classifications d'ouvrabilité proposées (Fig. 6.8), les formulations présentant une fluidité moyenne à élevée, une capacité du passage et une stabilité statique ont ensuite été sélectionnées et présentées dans le tableau 6.8. Ces formulations ont montré un étalement moyen à élevé ( $630 < \text{Ét (mm)} < 790$ ), ainsi que des valeurs de ségrégation statique faible à moyenne ( $0 < \text{ISS} < 10$ ) et de blocage ( $0 < \Delta_{\text{J-Ring (mm)}} < 64$ ). Par conséquent, 8 mélanges BAP-éco et BSAP-éco ayant une ouvrabilité moyenne à élevée préparés avec des systèmes granulaires M2, M3, M5, M6, M11, M15, M16 et M17 ont été sélectionnés (tableau 6.8). Il convient de mentionner que, comme indiqué précédemment dans le tableau 4.5, présentaient des valeurs de compacité granulaire comparables de  $0,749 \pm 0,010$ . Ces squelettes granulaires optimisés ont été formulés en utilisant différentes valeurs du paramètre  $q$  et rapport S/G, Ces 8 squelettes granulaires, optimisés dans la 1<sup>ère</sup> étape (référéncés SG-2), ont ensuite été sélectionnés pour proportionner les BAP-éco dans la 2<sup>ème</sup> étape de cette étude (Fig. 6.4) avec un faible de volume de pâte de 26%.

### 6.4.2. Caractéristiques de maniabilité et résistances à la compression ( $f'_{c-28d}$ ) des BAP-éco ayant un volume de pâte $V_P$ de 26%

Les proportions, la maniabilité et les résistances à la compression à 28 jours des BAP-éco fabriqués avec un volume de pâte inférieur de 26% et des squelettes granulaires SG-2 (optimisés à la 1<sup>ère</sup> étape) sont résumés au tableau 6.9.

Les mélanges contenant un volume de pâte 26% et de squelettes granulaires SG-2 présentaient des résistances à la compression ( $f'_{c-28d}$ ) entre 27,2 et 30,6 MPa. Ces valeurs sont conformes aux limites requises pour les applications résidentielles (c'est-à-dire 25 à 30 MPa). Les formulations étudiées ont montré un étalement (Ét.) entre 420 et 615 mm, un temps d'écoulement V-Funnel (VF) entre 4,2 et 18,5 s, un  $\Delta_{J-Ring}$  entre 15 et 45 mm et un indice de stabilité ISS entre 0% et 5,3%.

Comme le montre la Fig. 6.9, les maniabilités de ces formulations (tableau 6.9) sont comparées à celles obtenues dans le cas d'un volume de pâte  $V_P$  de 29% (1<sup>ère</sup> étape, tableau 6.6). Comme on peut l'observer sur les Figs. 6.9a et 6.9b, la diminution du volume de pâte de 29% à 26% et la teneur en liant de 309 à 277 kg /m<sup>3</sup> peuvent diminuer les diamètres d'étalement de 4% (M6) à 38% (M16), tout en augmentant les valeurs du temps d'écoulement VF de 43 % (M5) à 724% (M15). On peut ainsi conclure qu'un volume de pâte inférieur peut augmenter à la fois la viscosité plastique et le seuil d'écoulement des BAP-éco. Ceci est en accord avec les modèles théoriques proposés par (Krieger et Dougherty, 1959) et (Chateau *et al.*, 2008), où l'augmentation de la fraction volumétrique des particules solides (c'est-à-dire des valeurs  $V_P$  plus faibles) augmente considérablement les paramètres rhéologiques des suspensions de mortier. Cela peut être lié à des frictions interparticulaires plus élevées du granulat grossier, la viscosité plastique et le seuil d'écoulement de la phase fluide (c'est-à-dire le mortier), induites par l'augmentation de la teneur en sable. En outre, une augmentation plus élevée de la viscosité plastique par rapport à celles du seuil d'écoulement est cohérente avec l'augmentation plus élevée des temps d'écoulement par rapport à celles de l'étalement.

Tableau 6.6 Proportion, ouvrabilité et résistance à la compression des mélanges BAP-éco étudiés (1<sup>ère</sup> étape) fabriqués avec des squelettes granulaires SG-1 de la source I, Volume de pâte de 29%, teneur en liant de 309 kg/m<sup>3</sup>, rapport E/L de 0,60, une teneur en eau de 185,4 kg/m<sup>3</sup> et des dosages en SP et AEA de respectivement 900 et 16 ml/100 kg de liant.

Mélange granulaire No. (SG-1)	q (Eqs (2.8) et (2.10))	S/G	Sable I (kg/m <sup>3</sup> )	CAI1 (kg/m <sup>3</sup> )	CAI2 (kg/m <sup>3</sup> )	CAI3 (kg/m <sup>3</sup> )	Air (%)	Ouvrabilité		Capacité de passage		Stabilité	f <sub>c-28d</sub> <sup>*</sup> (MPa)
								Étalement (mm)	V-Funnel (s)	J-Ring (mm)	ΔJ-Ring (mm)	Indice de ségrégation statique (%)	
M1	0,00	0,45	784	678	0	314	5,0	625	6,1	530	95	10,5	31,5
M2		0,50	871	503	96	304	4,2	650	2,5	605	45	4,5	28,7
M3		0,55	958	175	415	223	4,8	640	2,0	590	50	5,9	31,5
M4		0,60	1045	0	517	206	5,0	615	2,6	525	90	3,9	29,3
M5	0,425	0,45	784	649	0	344	4,5	660	7,7	605	55	5,2	30,2
M6		0,50	871	353	272	278	4,2	640	4,4	615	25	4,3	34,7
M7		0,55	958	25	591	197	4,2	620	2,4	575	45	3,0	31,0
M8		0,60	1045	0	481	243	4,5	570	2,5	510	60	1,7	29,6
M9	0,450	0,45	784	537	122	334	3,8	770	2,4	715	55	10,1	30,7
M10		0,50	871	209	441	253	3,5	760	2,0	695	65	14,7	31,3
M11		0,55	958	0	591	222	4,0	680	2,1	650	30	9,2	31,3
M12		0,60	1045	0	445	278	4,0	660	2,1	575	85	3,4	29,9
M13	0,475	0,45	784	398	283	311	3,9	730	3,0	685	45	13,8	34,5
M14		0,50	871	71	602	230	4,1	720	2,2	685	35	12,6	33,9
M15		0,55	958	0	557	257	4,4	720	2,3	680	40	5,4	31,4
M16	0,500	0,60	1045	0	411	313	4,8	680	2,0	630	50	5,2	31,0
M17		0,45	784	266	437	290	3,8	660	7,4	630	30	5,1	33,1
M18		0,50	871	0	668	235	4,2	670	2,9	580	90	6,6	31,7
M19		0,55	958	0	522	292	5,8	610	1,7	565	45	2,3	29,1
M20		0,60	1045	0	376	348	6,2	605	1,8	515	90	3,7	28,3

\* L'écart type est compris entre 0,1 et 1,2 MPa



Tableau 6.7 Classification de l'ouvrabilité en fonction de la maniabilité, de la capacité de passage et des résultats de stabilité statique des mélanges BAP-éco proportionnés avec un volume de pâte de 29% (1<sup>ère</sup> étape sur la Fig. 4.6).

Aspects d'ouvrabilité	Niveau d'ouvrabilité		
	Faible	Moyen	Élevé
Maniabilité	$\text{Ét (mm)} \leq 630$	$630 < \text{Ét (mm)} \leq 710$	$710 < \text{Ét (mm)}$
Capacité de passage	$64 \leq \Delta_{J\text{-Ring}} \text{ (mm)}$	$32 \leq \Delta_{J\text{-Ring}} \text{ (mm)} < 64$	$0 < \Delta_{J\text{-Ring}} \text{ (mm)} < 32$
Stabilité statique	$10 \leq \text{ISS (\%)}$	$5 \leq \text{ISS (\%)} < 10$	$\text{ISS (\%)} < 5$

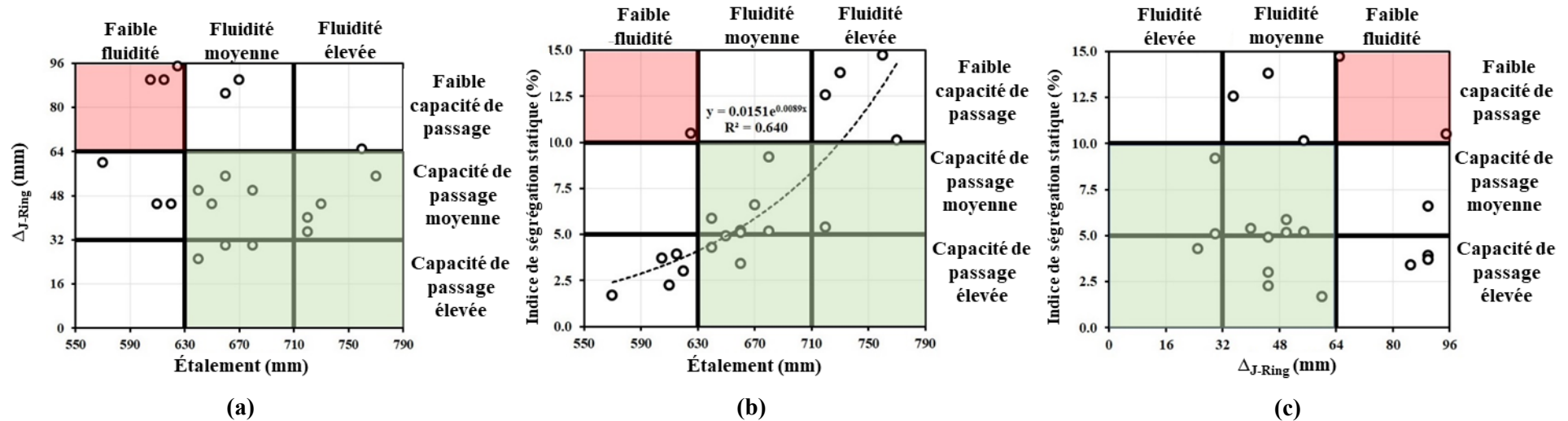


Figure 6.8 Classification des mélanges BAP-éco proportionnés avec un volume de pâte de 29% (1<sup>ère</sup> étape de la procédure expérimentale sur la Fig. 4.6), corrélant (a)  $\Delta_{J\text{-Ring}}$  (capacité de passage) par rapport à un étalement (fluidité), ainsi que la ségrégation statique indice (stabilité) par rapport à (b) étalement (fluidité), et (c) valeurs de  $\Delta_{J\text{-Ring}}$  (capacité de passage), les zones vertes et rouge se réfèrent respectivement aux zones de niveau d'ouvrabilité «moyenne à élevée» et «faible»,

Tableau 6.8 Les squelettes granulaires sélectionnés (SG-2) des mélanges BAP-éco fabriqués avec un volume de pâte de 29% et un niveau de maniabilité «moyen à élevé» (1<sup>ère</sup> étape sur la Fig.4.6).

Mélange granulaire No. (SG-2)	q (Éqs. 2.8 et 2.10)	S/G	Niveau de maniabilité	Niveau de capacité de passage	Niveau de résistance à la ségrégation
M2	0,400	0,500	Moyen	Moyen	Élevé
M3		0,550	Moyen	Moyen	Moyen
M5	0,425	0,450	Moyen	Moyen	Moyen
M6		0,500	Moyen	Élevé	Élevé
M11	0,450	0,550	Moyen	Élevé	Moyen
M15	0,475	0,550	Élevé	Moyen	Moyen
M16		0,600	Moyen	Moyen	Moyen
M17	0,500	0,450	Moyen	Élevé	Moyen

Comme on peut l'observer sur la Fig. 6.9c, la réduction du volume de pâte de 29% à 26% a augmenté la stabilité statique des mélanges étudiés jusqu'à 97% (M3). Cela peut s'expliquer par une surface spécifique plus élevée à cause des teneurs plus élevées en granulat, ce qui peut réduire l'épaisseur de mortier en excès et augmenter les friction interparticules. De plus, en raison d'une fraction de sable plus élevée, un faible volume de pâte peut augmenter la viscosité plastique du mortier (Chateau *et al.*, 2008; Krieger et Dougherty, 1959) et, par conséquent, la force de traînée exercée sur les particules solides en suspension. Ceux-ci peuvent réduire la migration des particules, ce qui entraîne une réduction du potentiel de ségrégation ( Roussel 2006). Il faut également noter que le mélange M5 a montré une augmentation négligeable de la ségrégation statique de 5,2% à 5,3%. Cependant, comme le montre la Fig. 6.9d, dans le cas de la capacité de passage, la diminution du volume de pâte peut entraîner soit une diminution (jusqu'à 73% pour M5) soit une augmentation (jusqu'à 33% pour M17) de l'indice de blocage de  $\Delta_{J-Ring}$ , selon les caractéristiques du squelette granulaire utilisé.

Tableau 6.9 Proportions, ouvrabilité et résistance à la compression des BAP-éco étudiés (2<sup>ème</sup> étape) fabriqués avec des squelettes granulaires SG-2 de la source I et un  $V_P$  de 26% \*Liant = 277 kg/m<sup>3</sup>, E/L = 0,60, Eau = 166,2 kg/m<sup>3</sup>, SP = 900 et AEA = 16 ml/100 kg de liant)

Mélange granulaire No. (SG-2)	q (Éqs (2.8) et (2.10))	S/G	Sable I (kg/m <sup>3</sup> )	CAI1 (kg/m <sup>3</sup> )	CAI2 (kg/m <sup>3</sup> )	CAI3 (kg/m <sup>3</sup> )	Air (%)	Ouvrabilité		Capacité de passage		Stabilité	f <sub>c-28d</sub> <sup>*</sup> (MPa)
								Étalement (mm)	V-Funnel (s)	J-Ring (mm)	Δ <sub>J-Ring</sub> (mm)	Indice de ségrégation statique (%)	
M2	0,400	0,50	911	526	100	318	4,9	560	11,6	515	45	0,4	30,6
M3		0,55	1002	183	433	233	6,0	490	4,2	470	20	0,0	27,3
M5	0,425	0,45	820	678	0	356	6,1	610	11,0	595	15	5,3	27,2
M6		0,50	911	369	285	290	5,4	615	15,3	595	20	2,3	30,6
M11	0,450	0,55	1002	0	618	232	5,2	570	6,0	540	30	2,4	29,1
M15	0,475	0,55	1002	0	582	269	4,9	535	18,5	490	45	0,7	29,7
M16		0,60	1093	0	429	328	7,6	420	5,4	400	20	0,4	30,0
M17	0,500	0,45	820	278	457	304	4,5	595	12,1	555	40	2,0	30,6

\* L'écart type est compris entre 0,1 et 1,1 MPa.

Tel que reporté par (Esmailkhanian et al., 2017), la stabilité ne semble pas être un problème dans la conception de BAP-éco en utilisant une pâte ayant une rhéologie adaptée et une teneur et une granulométrie optimales des granulats fins et grossiers. Cependant, une optimisation poussée des squelettes granulaires est nécessaire pour améliorer la fluidité et la capacité de passage des BAP-éco. En conséquence, de façon similaire aux classifications établies en tenant compte de l'ouvrabilité, établies à la 1<sup>ère</sup> étape (tableaux 6.7-6.10 et Fig. 6.8), trois différents niveaux de fluidité, de capacité de passage et de stabilité statique (faible, moyen et élevé), sont définis. Ces niveaux correspondent à trois différents niveaux d'étalement et de temps d'écoulement (aspects de fluidité liés au seuil d'écoulement et la viscosité plastique), ainsi que des valeurs de J-Ring (capacité de passage) et indice de stabilité statique (tableau 6.10). Les résultats des différents aspects de l'ouvrabilité des BAP-éco proportionnés avec 26 % de volume de pâte sont ensuite corrélés pour établir de nouvelles classifications basées sur l'ouvrabilité (Fig. 6.10).

Selon les niveaux d'ouvrabilité définis dans le tableau 6.10, les formulations étudiées peuvent être classées en deux différents niveaux d'ouvrabilité « faible » et « moyenne à élevée », indiqués respectivement par les zones rouge et verte sur la Fig.6.10. En conséquence, 2 formulations avec une fluidité « moyenne à élevée », une capacité de passage et une stabilité statique ont ensuite été sélectionnés (tableau 6.11). Ceux-ci incluent les formulations proportionnées avec les systèmes granulaires M3 et M11 et un volume de pâte de 26%. Il convient de mentionner que ces squelettes granulaires sont constitués d'un rapport S/G volumétrique de 0,55 et différentes valeurs du paramètres  $q$  de 0,4 et 0,45, ce qui compacité granulaires très comparables de  $0,744 \pm 0,002$ . Ces 2 squelettes granulaires optimisés correspondant aux systèmes M3 et M11 (2<sup>e</sup> étape, référencée SG-3) ont ensuite été sélectionnés pour proportionner les BAP-éco proportionné avec 24% de pâte étudiés dans la 3<sup>e</sup> étape de la procédure expérimentale (Fig. 4.6).

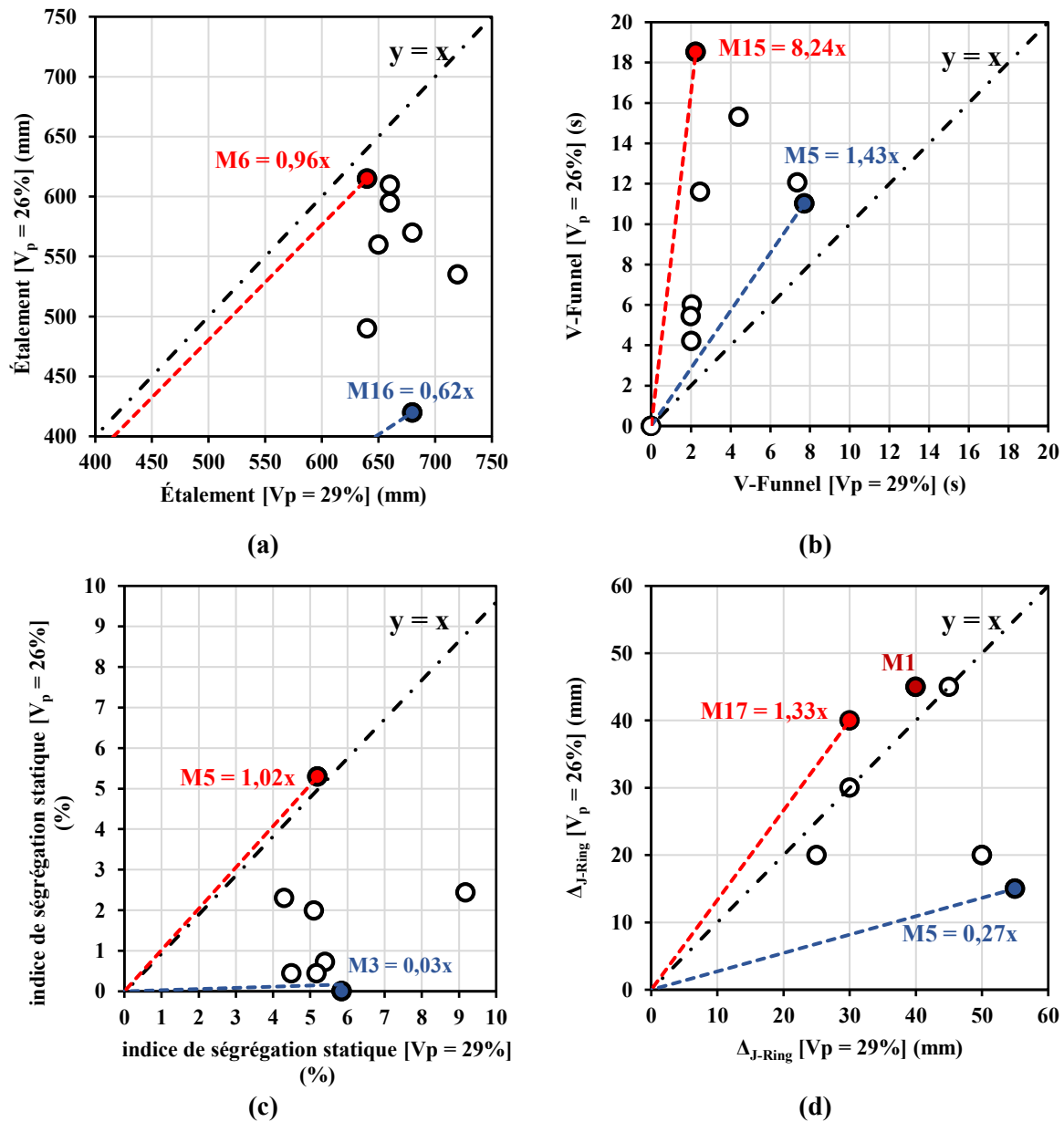


Figure 6.9 Comparaison entre les résultats d'ouvrabilité, (a) étalement, (b) V-Funnel, (c) indice de ségrégation statique, et (d)  $\Delta_{J-Ring}$  des BAP-éco fabriqués avec les volumes de pâte  $V_P$  de 26% et 29%.

Tableau 6.10 Classification de l'ouvrabilité selon la maniabilité (liée au seuil d'écoulement et à la viscosité plastique), la capacité de passage et les résultats de stabilité statique des BAP-éco étudiés avec un de  $V_P$  26% (2<sup>e</sup> étape).

Aspects d'ouvrabilité	Niveau d'ouvrabilité		
	Faible	Moyen	Élevé
Maniabilité	$\dot{E}t \text{ (mm)} \leq 480$	$480 < \dot{E}t \text{ (mm)} \leq 560$	$560 < \dot{E}t \text{ (mm)}$
Maniabilité et capacité passage (Lié à la viscosité)	$14 \leq VF \text{ (s)}$	$9 \leq VF \text{ (s)} < 14$	$VF \text{ (s)} < 9$
Capacité de passage	$32 \leq \Delta_{J-Ring} \text{ (mm)}$	$16 \leq \Delta_{J-Ring} \text{ (mm)} < 32$	$\Delta_{J-Ring} \text{ (mm)} < 16$
Stabilité statique	$4 \leq ISS \text{ (%)}$	$2 \leq ISS \text{ (%) } < 4$	$ISS \text{ (%) } < 2$

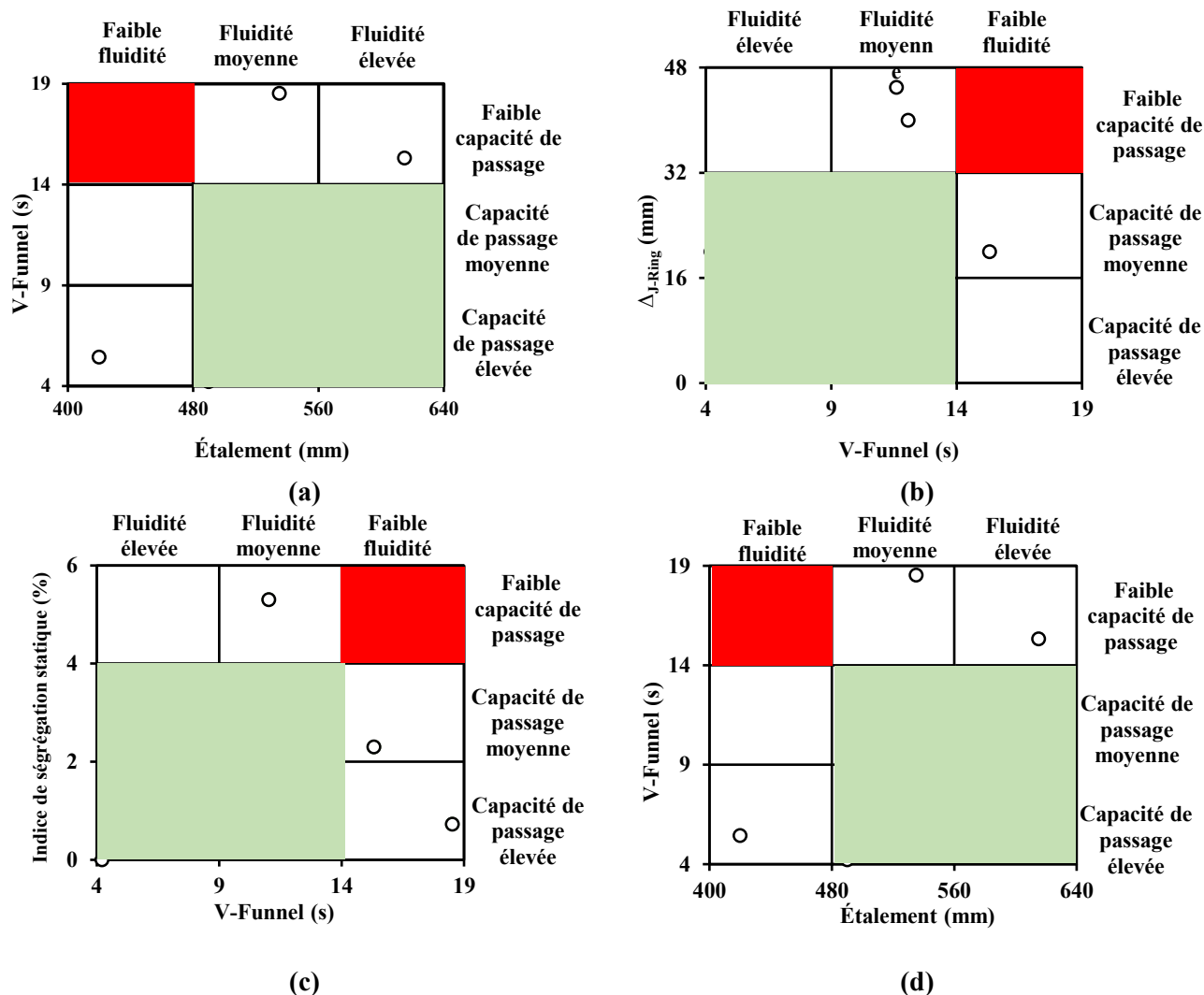


Figure 6.10 Classification des BAP-éco proportionnés avec un volume de pâte de 26% (2<sup>ème</sup> étape), (a) VF vs. étalement, (b)  $\Delta_{J-Ring}$  avec le temps d'écoulement VF, (c) ISS avec VF, et (d)  $\Delta_{J-Ring}$  avec étalement. Les zones verte et rouge se réfèrent respectivement aux niveaux d'ouvrabilité «moyenne à élevée» et «faible».

### 6.4.3. Ouvrabilité et résistance à la compression ( $f'c_{28d}$ ) des BAP-éco avec un volume de pâte $V_P$ de 24%

Les proportions, la maniabilité et la résistance à la compression  $f'c_{28d}$  des BAP-éco proportionnées avec un volume de pâte  $V_P$  de 24% et les squelettes granulaires SG-3 optimisés (2<sup>e</sup> étape) sont résumés dans le tableau 6.12. Comme on peut l'observer, malgré une faible teneur en liant de  $256 \text{ kg/m}^3$ , correspondant à un  $V_P$  de 24%, les formulations étudiées ont développé une  $f'c_{28d}$  appropriée de  $30,5 \pm 1,4 \text{ MPa}$ , ce qui peut être dû à des fractions solides ( $\phi/\phi_{\max}$ ) du squelette granulaire relativement élevées. Le  $\phi/\phi_{\max}$ , défini par le rapport du contenu volumétrique ( $\phi$ ) à la compacité granulaire ( $\phi_{\max}$ ) du granulat, indique la compacité du squelette

granulaire. Il est bien établi que l'optimisation de  $\phi/\phi_{\max}$  peut améliorer considérablement les caractéristiques physiques du béton (Mehdipour et Khayat, 2018; Ouro Koura *et al.*, 2020).

Comme présenté sur la figure 6.10, la diminution du volume de la pâte de 29% à 24% et la teneur en liant de 309 à 256 kg/m<sup>3</sup> ont conduit à une fluidité inférieure (étalement plus faible et un temps d'écoulement plus élevé, Figs. 6.10a et 6.10b), une stabilité statique améliorée (ISS, Fig. 6.10c), ainsi que des valeurs inférieures et supérieures de  $\Delta_{J\text{-Ring}}$  respectivement pour les mélanges M3 et M11 (Fig. 6.10d). De plus, cela a entraîné une demande en SP plus élevée (1074 vs 900 ml/100 kg de liant) pour atteindre un étalement minimum de 450 mm. Cependant, tous les résultats de fluidité, de capacité de passage et de stabilité statique obtenus dans le cas des formulations de la troisième étape sont conformes aux exigences d'ouvrabilité (Leclerc, 2011; Long *et al.*, 2017; Sotomayor Cruz, 2012; The European Project Group, 2005). En outre, la comparaison des valeurs d'étalement des mélanges M3 et M11 proportionnés respectivement avec 26% et 24% de volume de pâte a révélé que la diminution du volume de pâte de 26% à 24% a diminué les valeurs d'étalement de la formulation M3 de 490 à 450 mm. Cependant, l'augmentation des valeurs d'étalement de la formulation M11, malgré sa faible teneur en pâte, peut être attribuée aux dosages en SP plus élevés de 1074 ml/100 kg de liant pour un volume de pâte  $V_P$  de 24% (indiquées dans le tableau 6.12) par rapport à 900 ml/100 kg de liant (tableau 6.9) utilisé dans le cas de la formulation proportionnée avec volume de pâte de 26%.

Bien que les deux BAP-éco fabriqués avec volume de pâte de 24% satisfont aux exigences de maniabilité ciblées (tableau 6.12), le système granulaire M11 a permis d'obtenir une plus grande fluidité (étalement plus élevé et un temps d'écoulement VF plus faible), mais moins de capacité de passage et de stabilité statique ( $\Delta_{J\text{-Ring}}$  et ISS) que le système granulaire M3. En revanche, malgré la teneur comparable des granulats les plus fins (Sable I) et les plus grossiers (CAI3) dans les mélanges M3 et M11, ces systèmes granulaires correspondent à différents modules théoriques ( $q = 0,4$  et  $0,45$ ) de la distribution Fuller-Thomson et à des teneurs volumétriques des classes CAI1 et CAI2. Afin de proposer un modèle de granulométrie idéal qui peut répondre à toutes les exigences de maniabilité pour les BAP et BAP-Éco, les distributions granulométriques des squelettes granulaires GS-3 (c'est-à-dire M3 et M11) ont été étudiées. En conséquence, compte tenu des caractéristiques morphologiques des particules, évaluées à la section 4.6.2, de nouveaux modèles de distribution granulométrique sont proposés à la section suivante.

## 6.5. Nouveaux modèles de distribution granulométrique

Comme on peut le voir sur la Fig. 6.12, bien que les systèmes granulaires optimisés SG-3, y compris M3 et M11, aient été conçus avec deux valeurs différentes de  $q$  de 0,40 et 0,45 en utilisant le modèle de Fuller-Thomson (Figs. 6.12a et 6.12b), ils présentaient des distributions granulométriques très comparables (Fig. 6.12c) avec un coefficient de corrélation ( $R^2$ ) de 0,998 et une différence quadratique moyenne (DQM) faible de 1,7%. La valeur de DQM a été calculée comme suit:

$$DQM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [P_{M3}(d_i) - P_{M11}(d_i)]^2}{n}} \quad \text{Équation 6.2}$$

Où  $P_{M3}(d_i)$  et  $P_{M11}(d_i)$  sont les fractions volumétriques de particules plus fines que le tamis « $i$ » de taille  $d_i$  obtenues respectivement pour les systèmes granulaires M3 et M11, alors que  $n$  est le nombre total de tamis normalisés utilisés.

Différents modèles de granulométrie théorique ont ensuite été examinés dans cette étude pour évaluer leur adéquation pour prédire les distributions granulométriques de particules des systèmes granulaires M3 et M11. Ces modèles théoriques, à savoir les groupes A et B, sont décrits dans les sections suivantes.

Il convient de mentionner que les paramètres « $d_{\min}$ » et « $d_{\max}$ » dans les modèles théoriques (groupes A et B) sont remplacés par les valeurs minimales  $MD_{\min}$  et maximales  $MD_{\max}$  (tableaux 4.2 à 4.4) de toutes les sous-classes d'un système global donné. De plus, le paramètre « $d$ » dans les modèles du groupe A correspond à la taille des tamis normalisé, alors qu'il se réfère au diamètre moyen réel des particules de chaque sous-classe de granulat obtenu à partir des analyses morphologiques (c-à-d,  $D_{\text{avg}}$  dans les tableaux 4.2 à 4.4) dans les modèles du groupe B. En conséquence, les distributions expérimentales de la taille des particules ont été examinées en utilisant à la fois les tamis normalisés et les tailles morphologiques réelles et comparées aux modèles théoriques des groupes A et B. Les spécifications des courbes de granulométrie traditionnelles et nouvelles proposées sont présentées, aux sous-sections suivantes:



### 6.5.1. Modèles A1 et B1: modèle Fuller-Thompson (Fuller et Thomson, 1907)

$$P(d) = \frac{d^q - (d_{\min} = 0)^q}{d_{\max}^q - (d_{\min} = 0)^q} \times 100\% = \left(\frac{d}{d_{\max}}\right)^q \times 100\% \quad \text{Équation 6.3}$$

Où les valeurs du paramètre  $q$  sont 0,40 et 0,450, alors que les valeurs  $d_{\min}$  et  $d_{\max}$  sont respectivement 0 et 20 mm. Ces valeurs ont été initialement utilisées pour combiner les mélanges granulaires en utilisant le modèle de Fuller-Thompson (Fuller et Thomson, 1907).

Tableau 6.11 Les squelettes granulaires sélectionnés (SG-3) pour proportionner les BAP-éco avec un volume de pâte  $V_P$  de 26% et un niveau de maniabilité moyen à élevé (2<sup>e</sup> étape).

Mélange granulaire No..(SG-3)	q (Éqs. (2.8) et (2.10))	S/G	Niveau de maniabilité	Niveau de capacité de passage	Niveau de résistance à la ségrégation
M3	0,400	0,550	Moyen (étalement moyen) à élevé (temps d'écoulement faible)	Moyen	Élevé
M11	0,450		Élevé (étalement élevé et un temps d'écoulement faible)	Moyen	Moyen

Tableau 6.12 Proportions, ouvrabilité et résistance à la compression des BAP-éco étudiés (3<sup>e</sup> étape) fabriqués avec des squelettes granulaires SG-3 des sources I, un volume de pâte  $V_P$  de 24% (Liant = 256 kg/m<sup>3</sup>, E/L = 0,60, Eau = 153,6 kg/m<sup>3</sup>, SP = 1074 et AEA = 16 ml/100 kg de liant)

Granular Mixture No. (SG-3)	q (Éqs. (2.8) et (2.10))	S/G	Sable I (kg/m³)	CAI1 (kg/m³)	CAI2 (kg/m³)	CAI3 (kg/m³)	Air (%)	Ouvrabilité		Capacité de passage		Stabilité	f'c-28d* (MPa)
								Étalement (mm)	V-Funnel (s)	J-Ring (mm)	ΔJ-Ring (mm)	Indice de ségrégation statique (%)	
M3	0,400	0,550	1031	188	446	240	6,2	450	21,5	420	30	0,1	31,9
M11	0,450			0	636	239	6,0	610	15,8	550	60	3,5	29,1

\*Les écarts-types pour les mélanges M3 et M11 sont respectivement de 0,3 et 1,1 MPa.

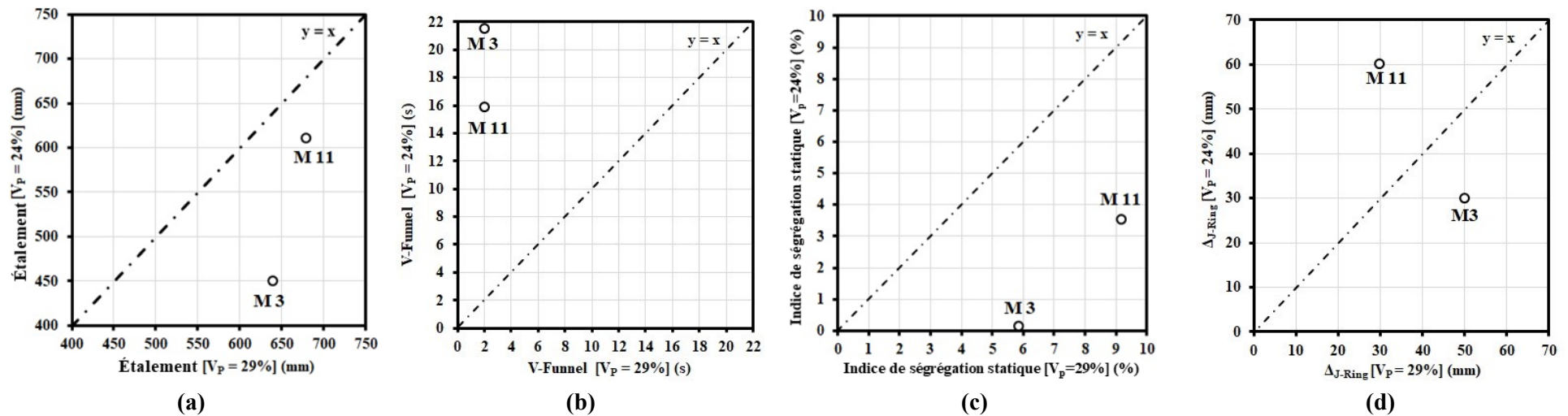


Figure 6.11 Comparaison entre les résultats d'ouvrabilité, (a) étalement, (b) Temps d'écoulement, (c) indice de ségrégation statique, et (d)  $\Delta_{J-Ring}$  des mélanges BAP-éco de volumes de pâte avec 24% et 29%.

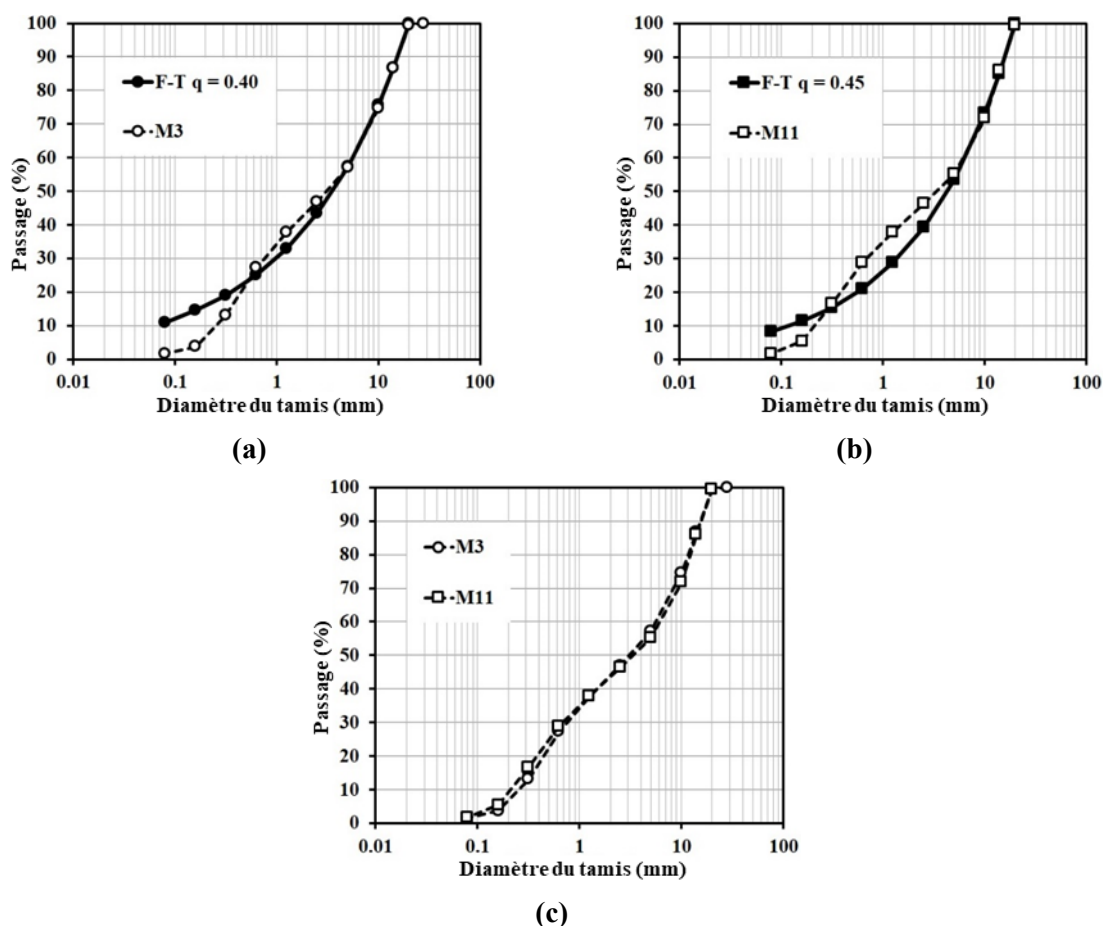


Figure 6.12 Comparaison entre les distributions granulométriques des modèles (a) M3 et F-T avec  $q$  de 0,40, (b) les modèles M11 et F-T (Fuller-Thomson) avec  $q$  de 0,45, et (c) les mélanges granulaires M3 et M11.

### 6.5.2. Nouveaux modèles A2 et B2 avec $d_{\min}$ et $d_{\max}$ modifiés utilisant le modèle Funk-Dinger

$$P(d) = \frac{d^q - d_{\min}^q}{d_{\max}^q - d_{\min}^q} \times 100\% \quad \text{Équation 6.4}$$

Où les valeurs  $d_{\min}$  et  $d_{\max}$  dans les modèles A2 et B2 sont remplacées par les diamètres morphologiques réels, qui correspondent respectivement aux valeurs minimales de  $MD_{\min}$  et maximales de  $MD_{\max}$  de toutes les sous-classes des mélanges de granulats étudiés M3 et M11 (tableau 4.2). D'autre part, de nouvelles valeurs du paramètre  $q$  du modèle de Funk-Dinger (Fuller et Thomson, 1907) sont obtenues en utilisant un solveur Microsoft Excel pour ajuster les courbes de granulométrie expérimentales correspondantes avec l'erreur la plus faible possible.

Afin de développer un nouveau modèle de courbe de granulométrie, deux conditions doivent être remplies, comme suit: 1) lorsque la taille des particules "d" est égale à la taille globale minimale ( $d_{\min}$ ) et maximale ( $d_{\max}$ ), la fraction solide totale plus fine que "d" » (c'est-à-dire  $P(d)$ ) doit être comprise entre 0% et 100%. En conséquence, un nouveau modèle de courbe de granulométrie est proposé dans cette étude pour prédire les distributions expérimentales de la taille des particules, comme suit:

### 6.5.3. Le nouveau modèle proposé: A3 and B3

$$P(d) = \left[ \frac{\ln(d) - \ln(d_{\min})}{\ln(d_{\max}) - \ln(d_{\min})} \right]^q \times 100\% \quad \text{Équation 6.5}$$

Où, à l'instar des modèles A2 et B2, les valeurs minimales de  $MD_{\min}$  et maximales de  $MD_{\max}$  de toutes les sous-classes des systèmes granulaires M3 et M11 obtenues par analyses morphologiques (tableaux 4.2 à 4.4) sont utilisées respectivement comme valeurs  $d_{\min}$  et  $d_{\max}$ . De plus, les valeurs du paramètre  $q$  des modèles A3 et B3 sont obtenues en utilisant un solveur Microsoft Excel pour prédire les distributions expérimentales correspondantes de la taille des particules des mélanges granulaires M3 et M11.

## 6.6. Validation pratique des modèles proposés

Les résultats de cette étude sont présentés en termes de comparaison entre la précision des modèles de granulométrie existants et proposés pour prédire les distributions granulométriques des mélanges M3 et M11 (4<sup>e</sup> étape, Fig. 4.6). La validation des modèles de granulométrie proposés pour formuler les BAP-éco en utilisant de nouvelles sources de granulats (5<sup>e</sup> étape, Fig. 4.6) a été réalisée. En fonction des résultats d'ouvrabilité obtenus sur les mélanges utilisés pour la validation, une nouvelle courbe de granulométrie idéale et son module de distribution correspondant sont proposés.

### 6.6.1. Comparaison entre les résultats des modèles de distribution granulométrique originaux et proposés

Les valeurs du paramètre  $q$  calculées obtenues pour différents modèles de distribution granulométrique des groupes A et B (équations 6.4 à 6.5) pour les mélanges M3 et M11 sont respectivement présentées aux tableaux 6.13 et 6.14. Comme on peut le constater, l'application de différents modèles de granulométrie, en utilisant les valeurs nominales et réelles  $d_{\min}$  et  $d_{\max}$ ,

ainsi que les tailles de tamis standard ou les diamètres morphologiques moyens ( $D_{avg}$ ) pour les tailles de particules «d», ont donné des valeurs différentes du paramètre q. Cependant, les nouveaux modèles de granulométrie ont donné des valeurs comparables pour les mélanges granulaires M3 et M11, ce qui n'est pas le cas avec les modèles de Fuller-Thomson (Fuller et Thomson, 1907).

La précision des modèles (A1-A3 et B1-B3) pour prédire la distribution granulométrique des mélanges granulaires M3 et M11 est évaluée en termes de  $R^2$  et de valeurs d'erreur quadratique moyenne (EQM) des corrélations établies. Les valeurs EQM ont été calculées en utilisant l'équation 6.6 :

$$EQM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [P_{Théorique}(d_i) - P_{Expérimental}(d_i)]^2}{n}} \quad \text{Équation 6.6}$$

Où  $P_{Théorique}(d_i)$  et  $P_{Expérimental}(d_i)$  sont les fractions volumétriques de particules plus fines que la sous-classe «i» avec la taille  $d_i$ , obtenues par les modèles théoriques (c-à-d, A1-A3 et B1-B3) et les distributions expérimentales de la taille des particules des mélanges M3 et M11, et n est le nombre total de sous-classes de granulats. La distribution granulométrique expérimentale des mélanges M3 et M11 et les distributions théoriques des particules obtenues en utilisant les modèles des groupes A et B (équations 6.4 - 6.6) sont respectivement présentés dans les Figs. 6.13 et 6.14. Comme on peut le constater, les nouveaux modèles de granulométrie A2, A3, B2 et B3 ont entraîné des valeurs EQM inférieures et un  $R^2$  supérieur par rapport aux modèles traditionnels de Fuller-Thompson, c'est-à-dire (A1 et B1). Ceci reflète ainsi une meilleure précision pour décrire la distribution granulométrique des granulats. De plus, parmi les nouveaux modèles proposés, les modèles A3 et B3 ont conduit à des valeurs EQM inférieures à A2 et B2, mais à des coefficients  $R^2$  comparables.

*Tableau 6.13 Les valeurs du paramètre q obtenues en utilisant les modèles théoriques du groupe A et la taille des particules «d» comme tailles de tamis standard pour les squelettes granulaires SG-3 (les valeurs d,  $d_{min}$  et  $d_{max}$  sont en mm).*

Mélange granulaire No. (SG-3)	S/G	Module de distribution q					
		Modèle A1 (Éq. 6.3)		Modèle A2 (Éq. 6.4)		Modèle A3 (Éq. 6.5)	
		$d_{min}$	$d_{max}$	$d_{min}$	$d_{max}$	$d_{min}$	$d_{max}$
		0	20	0,021	27,840	0,021	27,840
M3	0,55	0,4000		0,2461		1,8274	
M11		0,4500		0,2547		1,8590	

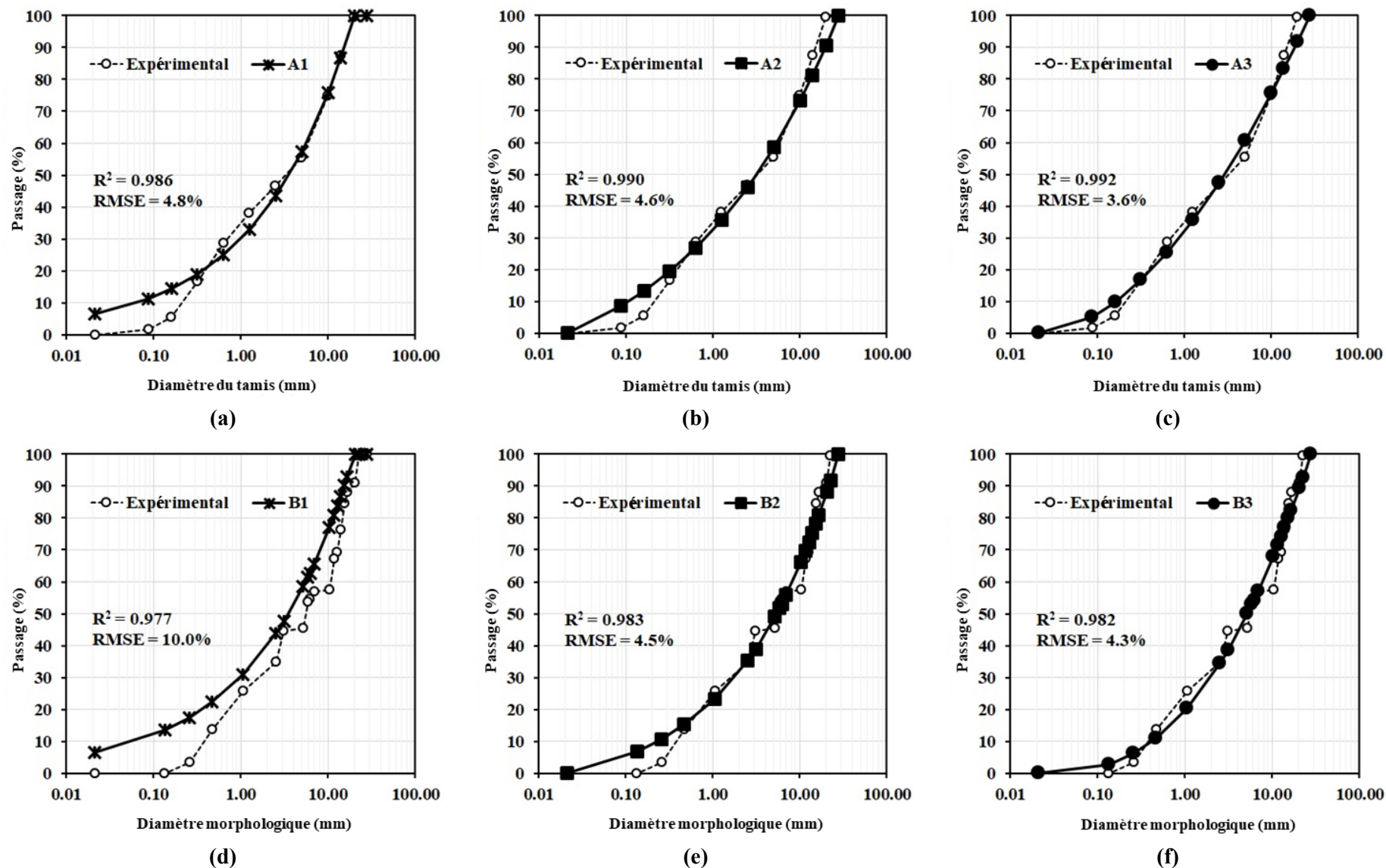


Figure 6.13 Comparaison entre les courbes de distribution expérimentales et théoriques en utilisant les modèles du groupe A (« $d$ » comme tailles de tamis standard) et du groupe B (« $d$ » comme diamètres morphologiques  $D_{avg}$ ), y compris (a) A1, (b) A2, (c) A3, (d) B1, (e) B2 et (f) B3 pour le mélange granulaire M3.

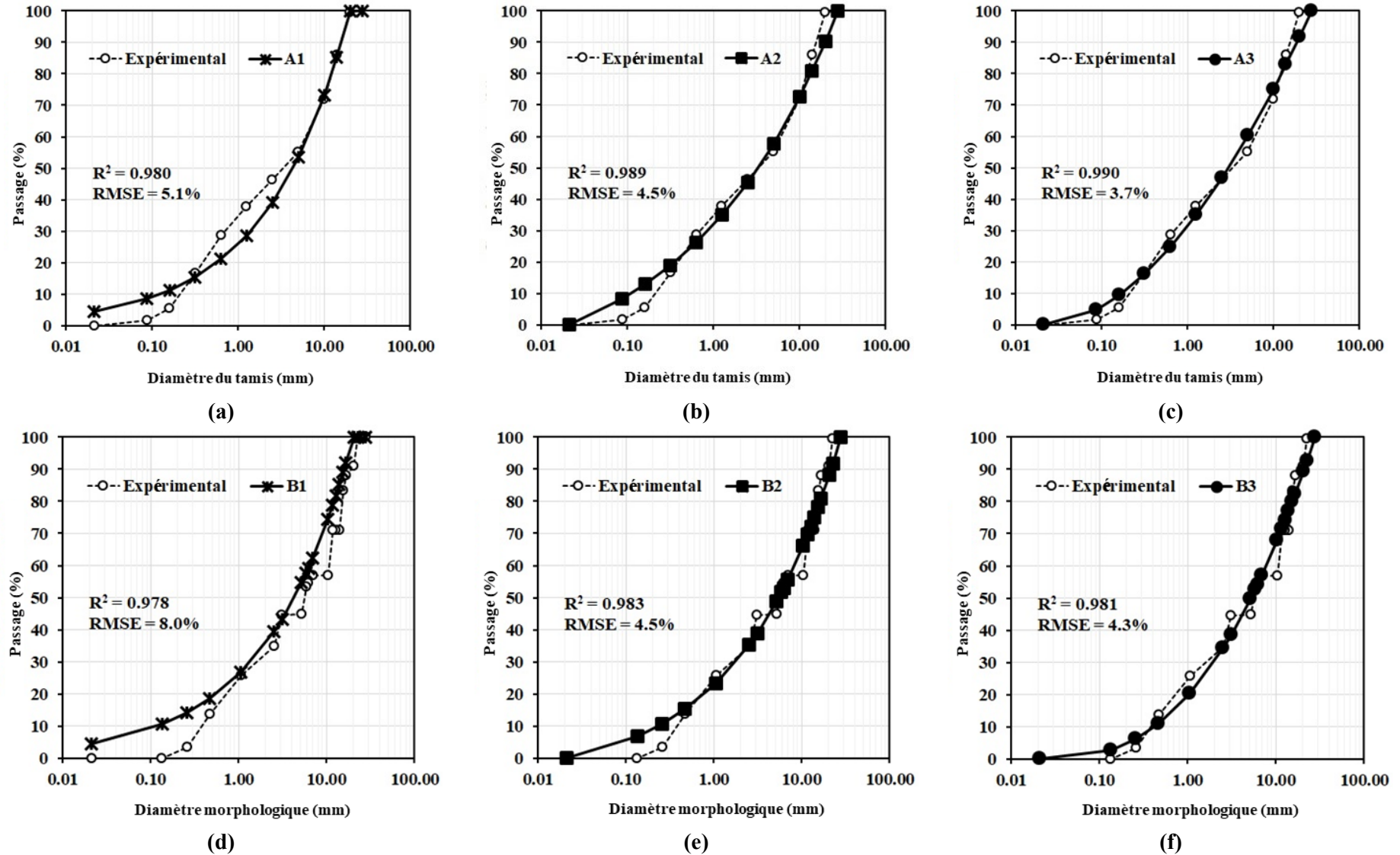


Figure 6.14 Comparaison entre les courbes de distribution expérimentales et théoriques en utilisant les modèles du groupe A («d» comme tailles de tamis standard) et du groupe B («d» comme diamètres morphologiques  $D_{avg}$ ), y compris (a) A1, (b) A2, (c) A3, (d) B1, (e) B2 et (f) B3 pour le mélange granulaire M11.

*Tableau 6.14 Les valeurs du paramètre q obtenues par les modèles théoriques du groupe B en utilisant la taille de particule « d » comme taille morphologique moyenne du granulat (valeurs  $D_{avg}$  dans le tableau 2) pour les squelettes granulaires SG-3 (les valeurs d,  $d_{min}$  et  $d_{max}$  sont en mm) .*

Mélanges granulaire No. (SG-3)	S/G	Module de distribution q					
		Modèle A1		Model B2		Model B3)	
		$d_{min}$	$d_{max}$	$d_{min}$	$d_{max}$	$d_{min}$	$d_{max}$
		0	20	0,021	27,840	0,021	27,840
M3	0,55	0,4000		0,3886		2,6186	
M11		0,4500		0,3897		2,6238	

### 6.6.2. Validation des nouveaux modèles de granulométrie avec de nouvelles sources de granulats II et III (5<sup>ème</sup> étape sur la Fig. 4.6)

Comme présenté précédemment, les mélanges granulaires M3 et M11 présentaient des distributions expérimentales de la taille des particules comparables (Fig. 6.12c), ainsi que des modules de distribution étroite obtenus en utilisant un nouveau modèle de granulométrie donné (tableaux 6.13 et 6.14). Par conséquent, pour chaque nouveau modèle de granulométrie A2, A3, B2 et B3, les modules de distribution moyenne correspondants ( $q_{A2}$ ,  $q_{A3}$ ,  $q_{B2}$  et  $q_{B3}$ ) sont calculés. Ces valeurs ont été calculées comme la moyenne des valeurs q correspondantes obtenues pour les mélanges granulaires M3 et M11 (tableaux 6.13 et 6.14), comme suit:

$$q_{A2} = \frac{q_{A2M3} + q_{A2M11}}{2} = \frac{0,2461 + 0,2547}{2} = 0,2504 \quad \text{Équation 6.7}$$

$$q_{A3} = \frac{q_{A3M3} + q_{A3M11}}{2} = \frac{1,8274 + 1,8590}{2} = 1,8432 \quad \text{Équation 6.8}$$

$$q_{B2} = \frac{q_{B2M3} + q_{B2M11}}{2} = \frac{0,3886 + 0,3897}{2} = 0,3892 \quad \text{Équation 6.9}$$

$$q_{B3} = \frac{q_{B3M3} + q_{B3M11}}{2} = \frac{2,6186 + 2,6238}{2} = 2,6212 \quad \text{Équation 6.10}$$

Afin de déterminer le modèle de granulométrie idéal et son module de distribution correspondant, les valeurs moyennes de q obtenues à l'aide des équations (6.7) - (6.9) et les modèles de granulométrie correspondants (équations 10 et 11) ont ensuite été validés pour deux nouvelles sources de granulats II et III (tableaux 4.1, 4.3 et 4.4). Par conséquent, Les valeurs  $d_{min}$  et  $d_{max}$  des modèles A2, A3, B2 et B3 (équations 6.4 et 6.5) sont remplacées par les diamètres morphologiques réels, correspondant aux valeurs minimales de  $MD_{min}$  et maximales de  $MD_{max}$  de toutes les sous-classes des nouvelles sources II et III (tableaux 4.3 et 4.4). En



revanche, la taille des tamis standard et les diamètres morphologiques moyens réels ( $D_{avg}$  dans les tableaux 4.3 et 4.4) sont utilisés dans les équations (6.4) et (6.5) comme paramètre de taille de particule « d » dans les nouveaux modèles A et B proposés utilisés pour les nouvelles sources de granulats. Différents solveurs ont ensuite été développés pour déterminer les fractions volumétriques de différentes classes des nouvelles sources d'agrégats, en utilisant les valeurs moyennes du paramètre  $q$  des modèles A2, A3, B2 et B3 (équations 6.7 à 6.10). La distribution granulométrique et les dimensions morphologiques de toutes les sous-classes des nouvelles sources de granulats sont considérées. Il convient également de noter que comme pour les squelettes granulaires optimisés (SG-3) des mélanges M3 et M11, le rapport S/G utilisé pour proportionner ces formulations a également été fixé à 0,55.

Les proportions obtenues de différentes fractions des sources II et III, leurs distributions granulométriques correspondantes et les modèles de granulométrie utilisés sont respectivement présentés dans les tableaux 6.15-6.16 et la Fig.6.12. Comme on peut l'observer, malgré l'obtention de proportions différentes de différentes classes de granulats, en utilisant les modèles A2 et A3, ainsi que les modèles B2 et B3 et leurs valeurs  $q$  correspondantes (c-à-d, Eqs 6.7 à 6.10) ont conduit à des distributions granulométriques très comparables. Ceci se traduit par des valeurs de  $R^2$  de 1,000 et des valeurs de EQM de 0,6%-0,8% obtenues pour la source II (Figs. 6.16a et 6.16b). Dans le cas de la source III, des valeurs de  $R^2$  de 0,998 et 1000, ainsi que des valeurs EQM de 0,8% et 1,7% ont été obtenues (Figs. 6.16c et 6.16d). Il est important de mentionner qu'en raison du nombre plus élevé de classes dans la source II (c-à-d, 4 classes de Sable II et CAII1-3) par rapport à celles de la source III (c-à-d, 3 classes de Sable III et CAIII1-2), leurs modèles de granulométrie pour un groupe donné (A ou B) sont comparables (c-à-d, valeurs de  $R^2$  plus élevés et EQM inférieures).

En utilisant les nouveaux mélanges granulaires des sources II et III, les BAP-éco ont été proportionnés et fabriqués avec un volume de pâte ( $V_p$ ) inférieur de 24%, une teneur en liant ( $TerC^3$ ) de 256 kg/m<sup>3</sup> et un rapport E/L de 0,60. Les mesures d'ouvrabilité et des résistances à la compression après 28 jours de ces mélanges sont présentées dans les tableaux 6.15-6.16 et la Fig. 6.15.

Tableau 6.15 Proportions volumétriques des squelettes granulaires de la source II optimisées à l'aide des modèles A2, A3, B2 et B3, ouvrabilité et résistance à la compression des BAP-éco correspondants ( $V_P = 24\%$ , teneur en liant =  $256 \text{ kg/m}^3$ ,  $E/L = 0,60$ , teneur en eau de  $153,6 \text{ k/m}^3$ ,  $HRWR = 1074$  et  $AEA = 16 \text{ ml/100 kg de liant}$ ).

Mélange granulaire No.	Modèle de granulométrie	q	d	$d_{\min}$ (mm)	$d_{\max}$ (mm)	Fraction volumétrique dans 1 m <sup>3</sup> de granulat					Caractéristiques des mélanges BAP-éco					
						Sable II (S/G)	CAII1	CAII2	CAII3	CAII4	Air (%)	Ét. (mm)	VF (s)	$\Delta_{J\text{-Ring}}$ (mm)	ISS (%)	$f'_{c-28d}$ *
M-II-A2	A2	0,2504	Diamètre du tamis  Diamètre morphologique	0,032	32,063	0,550	0,125	0,000	0,000	0,325	5,4	430	Blocage	30	0,0	27,7
M-II-A3	A3	1,8432					0,148	0,000	0,000	0,302	6,0	550	5,4	10	1,2	27,6
M-II-B2	B2	0,3892					0,084	0,003	0,136	0,227	5,5	460	5,5	10	1,1	29,1
M-II-B3	B3	2,6212					0,093	0,006	0,140	0,212	6,4	630	2,7	30	1,5	28,3

\* L'écart type est compris entre 0,0 et 0,3 MPa.

Tableau 6.16 Proportions volumétriques des squelettes granulaires de la source III optimisées à l'aide des modèles A2, A3, B2 et B3, ouvrabilité et résistance à la compression de leurs mélanges BAP-éco correspondants ( $V_P = 24\%$ , teneur en liant =  $256 \text{ kg/m}^3$ ,  $E/L = 0,60$ , teneur en eau de  $153,6 \text{ k/m}^3$ ,  $HRWR = 1074$  et  $AEA = 16 \text{ ml/100 kg de liant}$ ).

Mélange granulaire No.	Modèle de granulométrie	q	d	d <sub>min</sub> (mm)	d <sub>max</sub> (mm)	Fraction volumétrique dans 1 m <sup>3</sup> de granulat				Caractéristiques des mélanges BAP-éco					
						Sable III (S/G)	CAIII1	CAIII2	CAIII3	Air (%)	Ét. (mm )	VF (s)	Δ <sub>J-Ring</sub> (mm)	ISS (%)	f <sub>c-28d</sub> *
M-III-A2	A2	0,2504	Diamètre du tamis	0,133	31,495	0,550	0,090	0,056	0,304	4,9	300	Blocage	-	0,0	34,4
M-III-A3	A3 (	1,8432					0,045	0,102	0,304	6,2	580	10,8	20	2,5	30,2
M-III-B2	B2	0,3892	Diamètre morphologique				0,084	0,145	0,221	5,4	460	7,1	30	1,1	28,6
M-III-B3	B3	2,6212					0,041	0,155	0,254	6,0	590	9,6	30	3,4	30,3

\* L'écart type est compris entre 0,1 et 0,8 MPa.

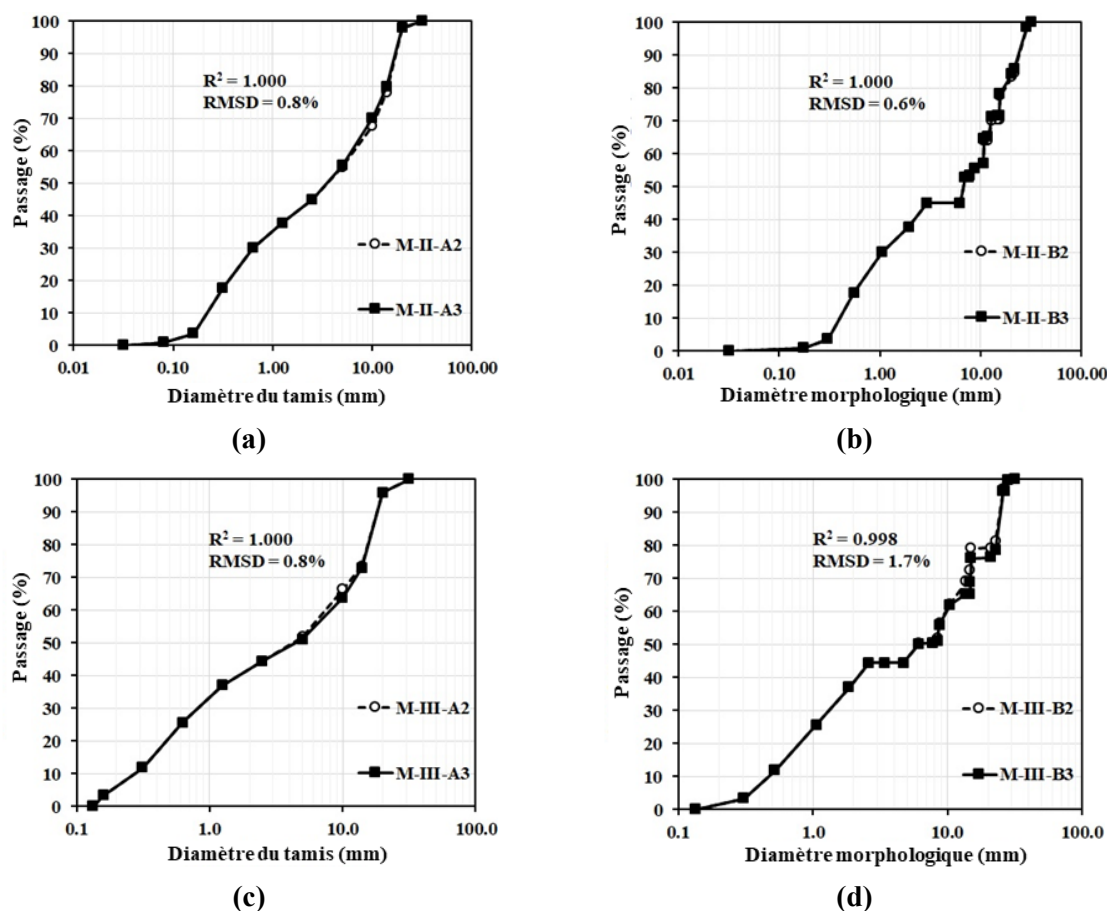
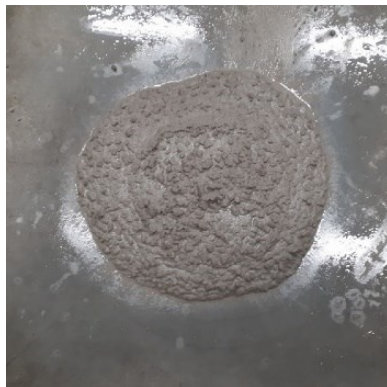


Figure 6.15 Distributions granulométriques des mélanges granulaires fabriqués par des sources de granulats (a, b) II, (c, d) III et optimisées par (a, c) A2 et A3 et (b, d) modèles de granulométrie B2 et B3.

Comme on peut l'observer dans les tableaux 6.15 et 6.16, tous les mélanges étudiés ont montré des valeurs de  $f'_{c-28d}$  variant de 27,6 à 34,4 MPa, ce qui est tout à fait approprié pour les applications résidentielles (25 à 30 MPa). De plus, à l'exclusion des mélanges conçus à l'aide du modèle A2 (c-à-d, M-II-A2 et M-III-A2), l'aptitude à l'écoulement, la capacité de passage et la stabilité statique des mélanges étudiés satisfont aux exigences de maniabilité des BSAP (Aïssoun *et al.*, 2016; Leclerc, 2011; Sotomayor Cruz, 2012). Ces mélanges ont montré des valeurs d'étalement, temps d'écoulement et  $\Delta J_{\text{Ring}}$  respectivement comprises entre 460 et 630 mm, 2,69 et 10,78 s et 10 et 30 mm, ainsi que de très faibles indices de ségrégation statique entre 1,1% et 3,4%. Cependant, en raison de la teneur la plus élevée du granulat le plus grossier (c-à-d, CAII4 et CAIII3), les mélanges M-II-A2 et M-III-A2 ont montré la fluidité et la capacité de passage les plus faibles, avec des étalements plus faibles respectivement de 430 et 300 mm, et blocage de l'écoulement dans le V-Funnel. Cependant, il convient de mentionner que malgré leur ouvrabilité adaptée, ces mélanges à faible liant peuvent être utilisés pour des applications de béton de masse à haute fluidité, où la réduction de la chaleur d'hydratation en minimisant la

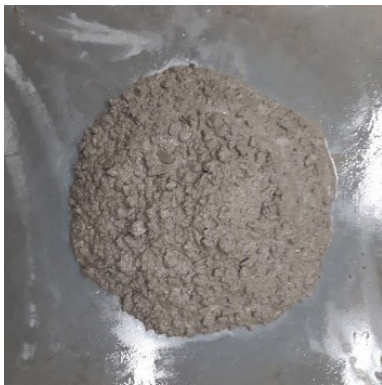
teneur en liant est d'un intérêt particulier. De plus, en raison de la densité de renforcement relativement faible de ces éléments, le souci de blocage est presque négligeable.



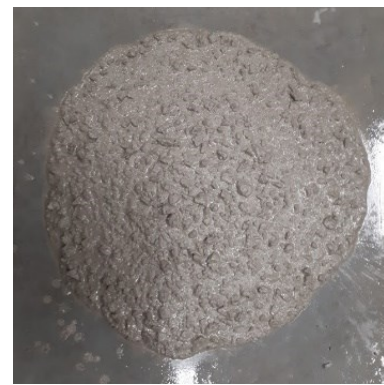
**(a) Étalement = 430 mm**



**(b) Étalement = 550 mm**



**(c) Étalement = 460 mm**



**(d) Étalement = 630 mm**

*Figure 6.16 Étalement des mélanges proportionnés avec la source des granulats II et en utilisant les modèles de granulométrie de (a) A2, (b) A3, (c) B2 et (d) B3 (les images ont été capturées avec la même échelle).*

En outre, l'utilisation de modèles de granulométrie du groupe B et la prise en compte des dimensions morphologiques des particules ont permis d'obtenir une fluidité plus élevée. Ceci reflété par un étalement plus élevé et un temps d'écoulement plus faible, que celles obtenues pour les mélanges conçus avec des modèles du groupe A (A2 et A3). D'un autre côté, parmi tous les modèles proposés, les mélanges conçus à l'aide du modèle B3, défini par le logarithme naturel des dimensions morphologiques du granulat, un rapport S/G de 0,55 et une valeur du paramètre q de 2,6212, présentaient des étalements les plus élevées de 630 et 590 mm pour respectivement les sources II et III. Par conséquent, le modèle B3 peut être recommandé comme courbe de granulométrie idéale pour les applications BAP-éco et BSAP-éco. Le modèle B3 est décrit comme suit :

$$P(d) = \left[ \frac{\ln(d) - \ln(d_{\min})}{\ln(d_{\max}) - \ln(d_{\min})} \right]^{2,6212} \times 100\% \quad \text{et} \quad \text{rapport volumétrique de S/G} = 0,55 \quad \text{Équation 6.11}$$

Où  $d_{\min}$  et  $d_{\max}$  sont les valeurs minimales de  $MD_{\min}$  et maximales de  $MD_{\max}$  de toutes les sous-classes des mélanges granulaires, et  $d$  est le diamètre moyen réel des particules de chaque sous-classe de granulats ( $D_{\text{avg}}$ ) obtenues à partir des analyses morphologiques.

Afin de calculer et de contrôler les variations du modèle de granulométrie proposé, ce dernier peut être réécrit comme suit:

$$P(d) = \left[ \frac{\ln \left( \frac{d}{d_{\min}} \right)}{\ln \left( \frac{d_{\max}}{d_{\min}} \right)} \right]^{2,6212} \times 100\% \quad \text{Équation 6.12}$$

D'un point de vue de précision, toute erreur possible pour mesurer les paramètres  $d$ ,  $d_{\min}$  et  $d_{\max}$  est liée à la précision du processus d'analyse d'image. En fait, toute surestimation ou sous-estimation des paramètres déterminés peut être attribuée aux faibles résolutions (nombre de pixels) des images numérisées. Par conséquent, ces erreurs devraient être comparables et seront compensées en équation 6.12.

D'autre part, comme expliqué dans la section 4.6.2, ces valeurs de diamètre ont été obtenues en tant que moyenne de plusieurs mesures réalisées sur différentes particules sélectionnées au hasard (par exemple 828 particules pour la source de granulats I). Par conséquent, en raison du nombre élevé d'échantillons, les mesures sont statistiquement représentatives. De plus, comme indiqué précédemment, l'exactitude du modèle proposé a été examinée sur trois différentes sources de granulats et a conduit à des résultats comparables. Le modèle de granulométrie a montré une robustesse et une répétabilité appropriées. À titre d'exemple, l'erreur de calcul de la fraction passante cumulée  $P(d)$  peut être calculée en considérant une étude de cas, comme suit:

Supposons tout d'abord que le premier ensemble de mesures morphologiques a abouti à  $d_1 = 11$  mm pour une sous-classe de granulats donnée,  $d_{\min-1} = 0,050$  mm et  $d_{\max-1} = 22$  mm pour l'ensemble des sous-classes de granulats. Selon le modèle de granulométrie proposé, la fraction de particules plus fine que  $d_1$ , c'est-à-dire  $P(d_1)$ , est calculée comme suit :

$$P(d_1 = 11 \text{ mm}) = \left[ \frac{\ln \left( \frac{11 \text{ mm}}{0,050 \text{ mm}} \right)}{\ln \left( \frac{22 \text{ mm}}{0,050 \text{ mm}} \right)} \right]^{2,6212} \times 100\% = 72,8\% \quad \text{Équation 6.13}$$

Supposons maintenant une sous-estimation/surestimation de 5% des mesures  $d_{\min}$ ,  $d_{\max}$  et  $d$ : c'est-à-dire,  $d_{\min-2} = 0,0475$  mm,  $d_{\max-2} = 23,1$  mm et  $d_2 = 11,55$  mm. Selon le modèle proposé,

la fraction de particules plus fines que la sous-classe de taille  $d_2$ , c'est-à-dire  $P(d_2)$ , est calculée comme suit:

$$P(d_2 = 11,55 \text{ mm}) = \left[ \frac{\ln \left( \frac{11,55 \text{ mm}}{0,0475 \text{ mm}} \right)}{\ln \left( \frac{23,1 \text{ mm}}{0,0475 \text{ mm}} \right)} \right]^{2,6212} \times 100\% = 73,2\% \quad \text{Équation 6.14}$$

Par conséquent, l'erreur d'estimation des valeurs  $P(d)$  pour cette sous-classe peut être calculée comme suit:

$$\text{Error (\%)} = \frac{|P(d_2) - P(d_1)|}{P(d_1)} \times 100\% = 0,5\% \quad \text{Équation 6.15}$$

Comme on peut le constater, une erreur de mesure de 5% pour les paramètres d'entrée  $d_{\min}$ ,  $d_{\max}$  et  $d$  a entraîné une erreur négligeable de 0,5%, ce qui correspond à  $\frac{1}{10}$  de l'erreur de mesure des paramètres d'entrée, pour calculer le passant cumulé de  $P(d)$ . De même, des erreurs d'estimation  $P(d)$  négligeables de 1,1% et 2,1% peuvent être obtenues malgré les erreurs de mesure assez élevées de respectivement 10% et 20% des paramètres d'entrée du modèle,  $D_{\min}$ ,  $d_{\max}$  et  $d$ .

## 6.7. Évaluation des performances d'écoulement des mélanges étudiés

Afin d'évaluer les différents aspects des performances d'écoulement des mélanges étudiés, les résultats expérimentaux de la maniabilité, la capacité de passage et la stabilité statique des 38 mélanges étudiés sont corrélés. Comme on peut l'observer sur la Fig. 6.17, les indices de ségrégation statique obtenus sont en accord avec leur étalement et les valeurs de  $\Delta_{J\text{-Ring}}$  avec un  $R^2$  acceptable de 0,747. Les mélanges ayant des valeurs d'étalement plus élevées présentaient un risque plus élevé de ségrégation statique. De plus, les mélanges avec une capacité de passage plus élevée (faible valeur de  $\Delta_{J\text{-Ring}}$ ) peuvent également assurer une stabilité statique plus élevée. Cependant, il semble que dans le cas des BAP et BSAP contenant une faible teneur en liant, les performances d'écoulement soient principalement contrôlées par l'étalement.

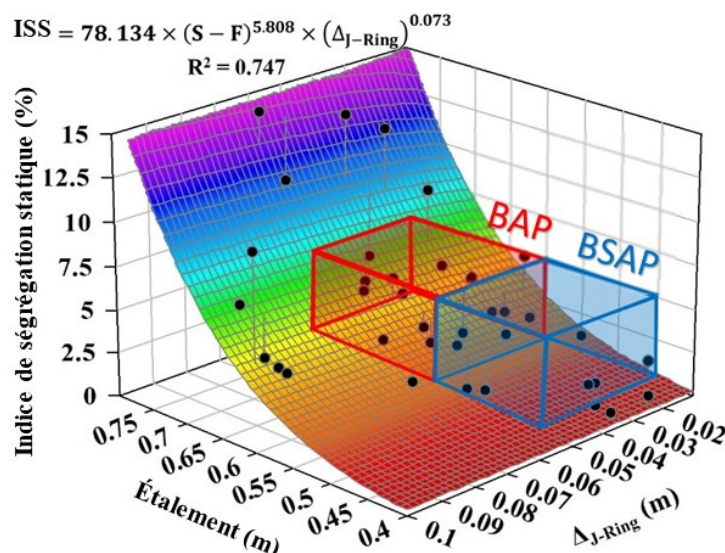


Figure 6.17 Évaluation des performances d'écoulement des formulations étudiées.

Les BAP-éco sélectionnés sont les M6, M7 et M19 (source de granulats I) proportionnées avec un volume de pâte ( $V_P$ ) de 29%, M6 (source de granulat I et 26 % de  $V_P$ ) et B3 (source de granulat II et 24% de  $V_P$ ). D'autre part, les BSAP sélectionnés sont M2, M3, M11, M15 et M17 (source de granulat I et  $V_P$  26%), M3 est proportionné avec un  $V_P$  26% et source de granulat I), B3 (source d'agrégat III et 24% de  $V_P$ ), A3 et B2 (sources d'agrégat II et III 24% de  $V_P$ ).

## 6.8. Évaluation de l'éco-efficacité des mélanges BAP-éco et BSAP-éco étudiés

Turner et Collins (Turner et Collins, 2013) rapporte que la production de 1 kg de ciment peut libérer jusqu'à 0,82 kg de  $CO_2$ . Par conséquent, le BAP-éco présente un intérêt particulier en raison de sa faible consommation de ciment, ce qui diminue considérablement ses impacts environnementaux. Selon Wallevik et al. (Wallevik *et al.*, 2014), un béton à faible teneur en carbone fait référence à un mélange dont les émissions totales de  $CO_2$  sont inférieures à 250 kg par unité de volume de béton. Afin d'évaluer l'impact environnemental d'un mélange donné, son potentiel de réchauffement globale (PRG), correspondant aux émissions de  $CO_2$  (en masse) par unité de volume de béton, est évalué. Le PRP est calculé comme la somme des émissions équivalentes de  $CO_2$  ( $CO_2$ -équ) correspondant à chacun des ingrédients de la formulation étudiée (Esmaeilkhani et al., 2017), comme suit:

$$PRG = \sum_{i=1}^n m_i \times g_i \quad \text{Équation 6.16}$$

Où «  $m_i$  » est la masse de l'ingrédient «  $i$  » par unité de volume de béton et «  $g_i$  » est la quantité du CO<sub>2</sub>-équ par unité de masse de l'ingrédient «  $i$  ». Dans cette section, les valeurs du PRG des différentes formulations étudiées dans les différentes étapes de cette étude (Fig.4.6) sont évaluées pour pouvoir classer les BAP-éco et BSAP-éco en fonction de la teneur en carbone. Les formulations ayant une faible teneur en carbone sont, par la suite, identifiées en utilisant la classification proposée par Wallevik et al, (Wallevik *et al.*, 2014). De plus, l'effet d'optimisation de la distribution granulométrique du squelette granulaire sur la réduction du PRG est également évalué. En conséquence, les valeurs CO<sub>2</sub>-équ de différents constituants des formulations étudiées, y compris le ciment GU (Wernet *et al.*, 2016), la fumée de silice (Grünewald et Schutter, 2016), les cendres volantes (Habert et al., 2011), l'eau (Grünewald et Schutter, 2016), SP (Environmental production declaration, Concrete admixtures - Plasticisers and Superplasticisers, 2015), AEA (Environmental production declaration, Concrete admixtures - Air entrainers, 2015), le sable (Grünewald et Schutter, 2016) et les granulats grossiers (Wernet *et al.*, 2016) ont été adoptés à partir de différentes bases de données récentes en utilisant l'approche de coupure (Grünewald et Schutter, 2016). Ces données sont résumées dans le tableau 6.17.

Tableau 6.17 Émissions équivalentes de CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub>-équ) des différents constituants des BAP-éco étudiés (en kg/kg)

Ciment (GU)	Fumée de silice	Cendre volante	Eau	SP	AEA	Sable	Granulats grossiers
0,83556	0,0052	0,00526	0,00034	1,88	0,527	0,0029	0,0042222

Il convient de mentionner qu'en fonction du montant alloué au processus de production primaire du béton, différentes approches peuvent être appliquées pour évaluer l'impact environnemental du béton produit. Il s'agit notamment de la procédure d'absence d'allocation (statut des déchets), ainsi que de deux autres procédures : l'allocation du ratio massique entre produits et sous-produits et l'allocation du ratio économique. Les allocations par valeur économique ou de masse induisent que les impacts sur la production primaire sont considérés par rapport à la valeur économique ou de masse des sous-produits. D'autre part, l'approche de coupure sans allocation économique ou de masse employée dans cette étude induit que seul le traitement des sous-produits est utilisé (Chen *et al.*, 2010; de Matos *et al.*, 2019; Petek Gursel *et al.*, 2014).



Selon les proportions des BAP-éco étudiés présentés dans les tableaux 6.6, 6.9, 6.12, 6.15 et 6.16, les valeurs moyennes du PRG (Eq. 6.16) des formulations étudiées ont été évaluées et résumées dans le tableau 6.18. De plus, ces valeurs ont été classées en fonction de leur volume correspondant de pâte, de la teneur en liant et du squelette granulaire dans différentes étapes expérimentales de cette étude (Fig. 4.6).

Comme le montre le tableau 6.18, les valeurs du PRG des BAP-éco étudiés variaient entre 172 et 206 CO<sub>2</sub>-équ kg/m<sup>3</sup> de béton. Par conséquent, selon la classification proposée par Wallevik et al. (Wallevik *et al.*, 2014), tous les mélanges entrent dans la catégorie des LCC (c'est-à-dire, un PRG total < 250 CO<sub>2</sub> kg /m<sup>3</sup> de béton). En outre, l'optimisation du squelette granulaire à l'aide des modèles de classement proposés et, par conséquent, la réduction progressive de la teneur en pâte et en liant de respectivement 29% à 24% et de 309 à 256 kg/m<sup>3</sup> a conduit à une diminution significative du PRG total de 206 à 172 CO<sub>2</sub>-équ kg/m<sup>3</sup> de béton, soit une réduction de 16%. D'autre part, comme présenté dans le tableau 6.18, les valeurs de PRG obtenues des formulations étudiées sont comparées à celles reportées dans la littérature pour les différents (principalement le BAP) contenant une faible teneur en ciment Portland (< 250 kg/m<sup>3</sup>) et une résistance à la compression de 30 ± 8 MPa après 28 jours d'âge (Celik *et al.*, 2015; Damineli *et al.*, 2010; Esmailkhanian, B. *et al.*, 2017; Gursel *et al.*, 2016; Long *et al.*, 2017; Matos *et al.*, 2019; Pelisser *et al.*, 2018). Damineli et ses collaborateurs ont présenté une base de données complète sur l'éco-efficacité des bétons proportionnées avec une large gamme de teneurs en liant et ayant des résistances à la compression ((Damineli *et al.*, 2010). Comme le montre le tableau 6.18, les valeurs du PRG des mélanges étudiés sont inférieures aux valeurs moyennes reportées par Damineli et ses collaborateurs (Damineli *et al.*, 2010) dans le cas des formulations de béton ayant une résistance moyenne à la compression de 30 MPa (soit 171,9 à 205,6 contre 100 à 500 CO<sub>2</sub>-équ kg/m<sup>3</sup>). De plus, l'utilisation du nouveau modèle de granulométrie proposé, ainsi que la réduction du volume de pâte de 29% à 24%, a résulté en des valeurs de PRG significativement plus faibles pour les mélanges étudiés par rapport à celles obtenues dans le cas des bétons conventionnels (Gursel *et al.*, 2016) et BAP (Celik *et al.*, 2015; Esmailkhanian, B. *et al.*, 2017; Long *et al.*, 2017; Matos *et al.*, 2019; Pelisser *et al.*, 2018) avec une résistance à la compression comparable de 30 MPa et une faible teneur en ciment Portland (< 250 kg/m<sup>3</sup>).

En plus de PRG, Damineli et ses collaborateurs ont proposé des indices d'intensité des liants (bi, cs) et CO<sub>2</sub> (ci, cs) pour évaluer l'éco-efficacité des matériaux à base de ciment (Damineli *et al.*, 2010). Les indices bi, cs, ci et cs indiquent respectivement la quantité requise de liant et la

quantité de CO<sub>2</sub> libérée pour une unité de résistance à la compression. Ces indices sont calculés comme suit:

$$b_{i,cs} = \frac{B}{f_c} \quad \text{Équation 6.17}$$

$$c_{i,cs} = \frac{PRG}{f_c} \quad \text{Équation 6.18}$$

Où B (kg/m<sup>3</sup>), f<sub>c</sub> (MPa) et PRG (CO<sub>2</sub>-équ kg/m<sup>3</sup>) sont respectivement la teneur en liant, la résistance à la compression et le potentiel de réchauffement global des formulations de béton étudiées. En conséquence, les valeurs moyennes des indices b<sub>i,cs</sub> et c<sub>i,cs</sub> des BAP-éco étudiés ont été calculées et classées en fonction de leur volume de pâte, teneur en liant et squelette granulaire correspondants (tableau 6.18). Comme on peut l'observer dans le tableau 6.18, la diminution du volume de pâte (29% à 26% et 24%) et de la teneur en liant (309 à 277 et 256 kg/m<sup>3</sup>), ainsi que l'optimisation des squelettes granulaires à l'aide du classement proposé ont causé une diminution des indices d'intensité du liant (b<sub>i,cs</sub>) et du CO<sub>2</sub> (c<sub>i,cs</sub>) respectivement de 10,0 à 8,4 et de 6,6 à 5,7 kg/m<sup>3</sup>/MPa. Il est à noter que dans le cas d'un volume de pâte de 24%, la légère augmentation des valeurs (b<sub>i,cs</sub>) et (c<sub>i,cs</sub>) pour les mélanges proportionnés avec les granulats des sources II et III (4<sup>e</sup> étape), par rapport à ceux proportionnés avec la source I (3<sup>e</sup> étape), peut être attribuée à leurs valeurs de résistance à la compression légèrement inférieures.

De plus, à l'instar des valeurs du PRG, les indices d'intensité de liant et de CO<sub>2</sub> des mélanges étudiés sont comparés à ceux reportés dans la littérature pour différents bétons proportionnés avec une faible teneur en ciment (< 250 kg/m<sup>3</sup>) et une résistance à la compression de 30 ± 8 MPa à un âge de 28 jours (Celik *et al.*, 2015; Damineli *et al.*, 2010; Esmaeilkhani, B. *et al.*, 2017; Gursel *et al.*, 2016; Long *et al.*, 2017; Matos *et al.*, 2019; Pelisser *et al.*, 2018). Comme on peut l'observer dans le tableau 18, les mélanges étudiés ont montré des valeurs comparables de b<sub>i,cs</sub>, c<sub>i</sub> et c<sub>s</sub>, mais inférieures à la moyenne de celles rapportées par Damineli et ses collaborateurs (Damineli *et al.*, 2010) (c'est-à-dire b<sub>i,cs</sub> ≈ 8 kg/m<sup>3</sup> / MPa et c<sub>i,cs</sub> entre 3 et 16 CO<sub>2</sub>-équ kg/m<sup>3</sup> / MPa) dans le cas des données collectées sur les bétons ayant une résistance à la compression de 30 MPa. Il convient de mentionner que les valeurs analysées concernent le béton conventionnel, tandis que le BAP et le BSAP nécessitent généralement des teneurs en liant plus élevées pour une résistance donnée afin d'atteindre les exigences de l'ouvrabilité et la stabilité. Par conséquent, les indices d'intensité du liant et du CO<sub>2</sub> des mélanges étudiés sont appropriés. En conséquence, la valeur relativement faible de c<sub>i,cs</sub> (4,7 CO<sub>2</sub>-équ kg/m<sup>3</sup>/MPa) obtenue par (Gursel *et al.*, 2016) pour le béton conventionnel peut être attribué à sa résistance

à la compression relativement élevée (38 MPa) par rapport aux mélanges étudiés dans cette étude ( $\approx 30$  MPa). De plus, par rapport aux autres BAP trouvés dans la littérature (Long et al. 2017; Esmailkhanian et al., 2017; Pelisser et al., 2018; Matos et al., 2019; Celik et al., 2015) ayant des résistances à la compression comparables l'optimisation de la distribution granulométrique à l'aide du modèle de granulométrie proposé et du volume de pâte jusqu'à 24% ont été considérablement réduites les valeurs  $b_{i,cs}$  et  $c_{i,cs}$ . De plus, il est utile de mentionner que la résistance à la compression a été maintenue malgré la réduction du liant. Cependant, il convient de noter qu'en dépit des améliorations d'éco-efficacité mentionnées, les exigences d'étalement n'ont pas été atteintes pour certaines formulations.

Tableau 6.18 Comparaison entre les indices d'intensité du potentiel de réchauffement globale (PRG) de liant ( $b_i$ ,  $c_s$ ) et de  $CO_2$  ( $c_i$ ,  $c_s$ ) des BAP-éco et BSAP-éco étudiés et ceux des mélanges trouvés dans la littérature.

Référence	$V_P$ (%)	Liant total (kg/m <sup>3</sup> )	Ciment Portland (kg/m <sup>3</sup> )	Squelette granulaire		PRG moyen (CO <sub>2</sub> -équ kg/m <sup>3</sup> de béton)	$b_{i,cs}$ moyen (kg/m <sup>3</sup> /MPa)	$c_{i,cs} v$ (CO <sub>2</sub> -équ kg/m <sup>3</sup> /MPa)
Étude actuelle	1 <sup>st</sup> étape	29	309	231,75	M1-M20 (SG-1: Tableau 6.6)	205,6 ± 0,1	10,0 ± 0,6	6,6 ± 0,4
	2 <sup>nd</sup> étape	26	277	207,75	M2-3, M5-6, M11, M15-17 (SG-2: Table 6.9)	185,3 ± 0,1	9,4 ± 0,5	6,3 ± 0,3
	3 <sup>rd</sup> étape				M3 et M11 (SG-3: Tableau 6.12)	172,688 ± 0,003	8,4 ± 0,5	5,7 ± 0,4
	4 <sup>th</sup> étape	24	256	192,00	Modèles proposés: A2, A3, B2, et B3 (Tableaux 6.15-6.16)	171,90 ± 0,03	8,7 ± 0,6	5,8 ± 0,4
(Damineli <i>et al.</i> , 2010) ( $f'_{c-28d}$ : ≈ 30 MPa)	N/A	≈ 250	N/A	N/A		≈ 100 - 500	≈ 8	≈ 3 - 16
(Celik <i>et al.</i> , 2015) (Ét. : 572 - 653 mm) ( $f'_{c-28d}$ : 26,0 - 33,9 MPa)	≈ 32	446 - 449	156 - 202	S/G <sub>wt</sub> = 0,50, TMG = 19 mm		231 - 282	13,2 - 17,2	8,0 - 8,9
(Gursel <i>et al.</i> , 2016) (Béton conventionnel) ( $f'_{c-28d}$ : ≈ 38 MPa)	≈ 26	369	147	S/G <sub>wt</sub> = 0,35, TMG = 10 mm		≈ 180	≈ 9,7	≈ 4,7
(Long <i>et al.</i> , 2015) (Ét.: 545 - 620 mm) ( $f'_{c-28d}$ : 24,6 - 37,7 MPa)	27-30	320 - 380	152 - 320	S/G <sub>wt</sub> = 0,40 - 0,50, TMG = 16 mm		272,77	9,2 - 14,2	7,2 - 11,1
(Esmailkhanian, B. <i>et al.</i> , 2017) (Ét.: 560 - 640 mm) ( $f'_{c-28d}$ : 23,0 - 30,0 MPa)	32-36	278 - 298	196 - 243	S/G <sub>wt</sub> = 0,54, TMG = 20 mm		170,2 - 210,0	9,8 - 13,0	6,2 - 8,5
(Pelisser <i>et al.</i> , 2018) (Ét.: 660 - 665 mm) ( $f'_{c-28d}$ : 28,6 - 36,7 MPa)	30-33	293,4	240	S/G <sub>wt</sub> = 0,51, TMG = 16 mm		N/A	9,1 - 10,2	N/A
(de Matos <i>et al.</i> , 2019) (Ét.: 695 mm) ( $f'_{c-28d}$ : ≈ 35 MPa)	≈ 40	424	211	S/G <sub>wt</sub> = 0,48, TMG = 12,5 mm		251,1	≈ 12,1	≈ 7,2

$V_P$  : Volume de pâte, N/A : Indisponible, Ét.: Étalement,  $f'_{c-28d}$  : 28-j résistance à la compression, S/G<sub>wt</sub> : Rapport sable/granulats total (en poids), et TMG : La taille maximale de granulat,

## CHAPITRE 7 CONCLUSIONS

Dans la première partie de cette étude, les distributions granulométriques de différents mélanges granulaires proportionnés avec quatre différentes sources de granulats ont été étudiées en utilisant divers modèles de granulométrie théorique et en tenant compte des caractéristiques de forme des particules. Les caractéristiques morphologiques des différentes sous-classes d'agrégats ont été évaluées à l'aide de techniques d'analyse d'images 3D. Sur la base des résultats présentés dans cette étude, les conclusions suivantes peuvent être tirées:

- Une nouvelle méthodologie a été proposée pour évaluer les caractéristiques morphologiques des granulats, notamment la taille (les diamètres maximum, minimum et moyen), la forme (facteur d'élanement et circularité) et la texture de surfaces (rugosité) à l'aide d'analyses d'images 3D. Les caractéristiques morphologiques combinées des granulats montrent des bonnes corrélations entre elles.
- Un nouveau modèle théorique de distribution granulométrique a été proposé en considérant le logarithme naturel des tailles du granulat et ses caractéristiques morphologiques. Les modèles proposés permettent une meilleure description des courbes de granulométrie expérimentales des systèmes granulaires étudiés que les modèles traditionnels de Fuller-Thompson (Fuller et Thomson, 1907) et Funk-Dinger (Funk et Dinger, 1994). L'utilisation des diamètres minimum et maximum des granulats en tenant compte de leurs valeurs morphologiques réelles améliore considérablement la précision du modèle traditionnel de Funk-Dinger (Funk et Dinger, 1994).
- L'utilisation des diamètres réels des granulats au lieu des tailles de tamis standard améliore la précision des modèles de granulométrie. Afin de simplifier les investigations morphologiques, les valeurs morphologiques du paramètre  $q$  sont estimées en tant que fonctions linéaires des valeurs de  $q$  obtenues en utilisant les diamètres des tamis.

- Les modèles de granulométrie proposés, y compris les modèle logarithmique et Funk-Dinger modifié (Funk et Dinger, 1994) ont été validés en utilisant trois différentes sources locales de granulats. D plus, L'augmentation du nombre de classes de granulat (utilise les tailles morphologiques) améliore la précision des modèles proposés.

Dans la deuxième partie de cette étude, l'aptitude à l'écoulement, la capacité de passage, la stabilité statique et la résistance à la compression de 38 BAP-éco et BSAP-éco destinés pour des applications résidentielles ont été étudiées. Les squelettes granulaires des mélanges étudiés ont été conçus en utilisant différents modules de distribution  $q$  de 0,4 à 0,5 en utilisant le modèle de Fuller-Thompson (Fuller et Thomson, 1907) et des rapports volumétriques sable/granat total (S/G) de 0,45 à 0,60. Le dosage des granulats des mélanges étudiés ont été optimisées à l'aide de trois différentes sources de granulat et de nouveaux modèles de granulométrie empirique proposés pour minimiser la teneur de liant et pâte. Une procédure expérimentale par étapes a été réalisée pour répondre aux exigences de maniabilité des BSAP-éco et de résistances à la compression d'au moins 25 MPa à un âge de 28 jours. Sur la base des résultats présentés dans cette étude, les conclusions suivantes peuvent être tirées:

- Une procédure expérimentale a été appliquée avec succès pour réduire considérablement le volume de pâte de 29% à 24% et la teneur en liant de 309 à 256 kg/m<sup>3</sup>, tout en garantissant un niveau de maniabilité moyen à élevé, correspondant respectivement à BAP-éco et BSAP-éco, et valeurs de résistance à la compression appropriées pour les applications résidentielles. En utilisant les classifications d'ouvrabilité proposées, les squelettes granulaires optimisés ont été sélectionnés pour établir les nouveaux modèles de granulométrie.
- Les formulations contenant le moins de liant et proportionnés avec les squelettes granulaires optimisés ont atteint une stabilité statique plus élevée. La ségrégation statique ne semble pas être un problème lors de la conception des BAP-éco et BSAP-éco en optimisant le squelette granulaire. Cependant, la réduction de la pâte a montré un effet plus dominant sur l'augmentation des temps d'écoulement au V-

Funnel (augmentation de la viscosité) que sur la diminution des étalements (augmentation du seuil d'écoulement) des mélanges.

- De nouveaux modèles théoriques de distribution de la taille des particules en fonction du logarithme naturel de la taille des particules et le modèle modifié de Funk-Dinger ont été proposés en considérant les dimensions réelles des particules, y compris le diamètre morphologique minimum, maximum et moyen de particules. Les modèles proposés ont montré une bonne description des courbes de granulométrie expérimentales des systèmes granulaires optimisés que les modèles traditionnels de Fuller-Thomson (Fuller et Thomson, 1907) et Funk-Dinger (Funk et Dinger, 1994). De nouveaux modules de distribution « q » ont été également proposés comme valeurs moyennes pour les squelettes granulaires optimisés.
- Une nouvelle courbe de granulométrie idéale pour les applications BAP-éco et BSAP-éco a été proposée en considérant le logarithme naturel des dimensions morphologiques des particules et un module de distribution  $q = 2,6212$  et un rapport sable/granulat total = 0,55. L'utilisation de la courbe de granulométrie idéale proposée a entraîné une fluidité plus élevée, une capacité de passage appropriée, une stabilité statique et des résistances à la compression par rapport à ceux conçus avec des modèles de granulométrie traditionnels.
- Les analyses d'éco-efficacité ont montré que l'utilisation de l'approche expérimentale par étapes et des modèles de granulométrie d'optimisation proposés ont abouti à des mélanges BAP-éco plus écologiques. Les valeurs de PRG calculées ont confirmé que tous les mélanges étudiés appartiennent à la catégorie du béton à faible teneur en carbone (émission de  $\text{CO}_2 < 250 \text{ kg/m}^3$ ). De plus, l'approche proposée a réduit de manière significative les valeurs totales du PRG de 206 à 172  $\text{CO}_2$ -équ  $\text{kg/m}^3$ , la consommation de liant de 10,0 à 8,4  $\text{kg/m}^3/\text{MPa}$  et les indices d'intensité de  $\text{CO}_2$  de 6,6 à 5,7  $\text{CO}_2$ -équ  $\text{kg/m}^3/\text{MPa}$ . De plus, l'optimisation du mélange a permis d'atteindre la résistance à la compression ciblée pour une teneur en liant inférieure.

**Recommandations**

L'un des paramètres les plus importants à étudier est l'effet de l'utilisation d'un autre type de ciment avec des ajouts cimentaire ou des fillers, ou un ciment a haut performance pour augmenter la résistance à la compression ou la réduction de la demande en eau peuvent être utiles pour favoriser l'application de BAP-éco avec une qualité supérieure. Il est également suggéré de réaliser des projets à grande échelle avec BAP-eco et de collecter des données de terrain sur le processus de production, la coulée et le contrôle de la qualité.



## LISTE DES RÉFÉRENCES

- ACI 237R (2007) Self Consolidating Concrete, p. 29.
- ACI committee 318 (2011) Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI 318M-11). American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
- Aïssoun, B. M., Hwang, S. D. et Khayat, K. H. (2016) Influence of aggregate characteristics on workability of superworkable concrete. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*.
- Aïtcin, P. C. (2000) Cements of yesterday and today - concrete of tomorrow. *Cement and Concrete Research*.
- Andreasen, A. H. M. (1930) Ueber die Beziehung zwischen Kornabstufung und Zwischenraum in Produkten aus losen Körnern (mit einigen Experimenten). *Kolloid-Zeitschrift*.
- ASTM (2012) ASTM C117. Standard Test Method for Materials Finer than 75-  $\mu$  m ( No . 200 ) Sieve in Mineral. Annual Book of ASTM Standards.
- ASTM C1611M (2014) Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete. ASTM International.
- ASTM C1621 (2014) C 1621M-09b « Standard Test Method for Passing Ability of Self-Consolidating Concrete by J-Ring ». Annual Book of ASTM Standard.
- ASTM International (2001) C 136-01 Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. Annual Book of ASTM Standards.
- Bilodeau, A. et Mohan Malhotra, V. (2000) High-volume fly ash system: Concrete solution for sustainable development. *ACI Structural Journal*.
- Boden, T. a, Marland, G. et Andres, R. J. (2009) Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO<sub>2</sub> Emissions. Carbon Dioxide Information Analysis Center Oak Ridge National Laboratory USA Oak Ridge TN Department of Energy.
- Bolomey, J. (1947) The grading of aggregates and its influence on the characteristics of concrete. *Rev Mater constr trav Publ*, p. 147-149.
- Bouwman, A. M., Bosma, J. C., Vonk, P., Wesselingh, J. A. et Frijlink, H. W. (2004) Which shape factor(s) best describe granules? *Powder Technology*.
- Bouzoubaâ, N., Zhang, M. H. et Malhotra, V. M. (2001) Mechanical properties and durability of concrete made with high-volume fly ash blended cements using a coarse fly ash. *Cement and Concrete Research*.

- Brouwers, H. J.H. et Radix, H. J. (2005) Self-compacting concrete: Theoretical and experimental study. Cement and Concrete Research.
- Brouwers, H. J H et Radix, H. J. (2005) Self-compacting concrete: Theoretical and experimental study. Cement and Concrete Research.
- Celik, K., Meral, C., Petek Gursel, A., Mehta, P. K., Horvath, A. et Monteiro, P. J. M. (2015) Mechanical properties, durability, and life-cycle assessment of self-consolidating concrete mixtures made with blended portland cements containing fly ash and limestone powder. Cement and Concrete Composites.
- Cepuritis, R., Jacobsen, S., Pedersen, B. et Mørtzell, E. (2016) Crushed sand in concrete - Effect of particle shape in different fractions and filler properties on rheology. Cement and Concrete Composites.
- Chateau, X., Ovarlez, G. et Trung, K. L. (2008) Homogenization approach to the behavior of suspensions of noncolloidal particles in yield stress fluids. Journal of Rheology.
- Chen, C., Habert, G., Bouzidi, Y., Jullien, A. et Ventura, A. (2010) LCA allocation procedure used as an incitative method for waste recycling: An application to mineral additions in concrete. Resources, Conservation and Recycling.
- Collepardi, M. (2003) Self-Compacting Concrete: what is new? Proceedings of 7th CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete.
- Cox, E. P. (1927) A method of assigning numerical and percentage values to the degree of roundness of sand grains. Journal of Paleontology, vol. 1, n°3, p. 179– 183.
- Damineli, B. L., Kemeid, F. M., Aguiar, P. S. et John, V. M. (2010) Measuring the eco-efficiency of cement use. Cement and Concrete Composites.
- Damtoft, J. S., Lukasik, J., Herfort, D., Sorrentino, D. et Gartner, E. M. (2008) Sustainable development and climate change initiatives. Cement and Concrete Research.
- De Larrard, F. (1999) Concrete mixture proportioning: A scientific approach. The effects of brief mindfulness intervention on acute pain experience: An examination of individual difference (Vol. 1).
- de Matos, P. R., Sakata, R. D. et Prudêncio, L. R. (2019) Eco-efficient low binder high-performance self-compacting concretes. Construction and Building Materials.
- Dewar, J. . (1999) Computer Modelling of Concrete Mixtures. London : E & FN Spon.
- Domone, P. L. (2006) Self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies. Cement and Concrete Composites.
- Environmental production declaration, Concrete admixtures - Air entrainers (2015)European Federation of Concrete Admixtures Associations Ltd. (EFCA), p. EPD-EFC-20150086-IAG1-EN. Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU).
- Environmental production declaration, Concrete admixtures - Plasticisers and

- Superplastisizers (2015) European Federation of Concrete Admixtures Associations Ltd. (EFCA), vol. EPD-EFC-20. Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU).
- Erdoğan, S. T., Martys, N. S., Ferraris, C. F. et Fowler, D. W. (2008) Influence of the shape and roughness of inclusions on the rheological properties of a cementitious suspension. *Cement and Concrete Composites*.
- Esmailkhanian, B., Khayat, K. H. et Wallevik, O. H. (2017) Mix design approach for low-powder self-consolidating concrete: Eco-SCC—content optimization and performance. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, vol. 50, n°2, p. 1-18.
- Esmailkhanian, B. (2016) DEVELOPMENT OF LOW-POWDER SELF-CONSOLIDATING CONCRETE, ECO-SCC: DESIGN AND PERFORMANCE. Thèse de doctorat, UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE.
- Esmailkhanian, B., Diederich, P., Khayat, K. H., Yahia, A. et Wallevik, H. (2017) Influence of particle lattice effect on stability of suspensions: application to self-consolidating concrete. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*.
- Estephane, P., Garboczi, E. J., Bullard, J. W. et Wallevik, O. H. (2019) Three-dimensional shape characterization of fine sands and the influence of particle shape on the packing and workability of mortars. *Cement and Concrete Composites*.
- Felekoğlu, B. (2007) Effects of PSD and surface morphology of micro-aggregates on admixture requirement and mechanical performance of micro-concrete. *Cement and Concrete Composites*.
- Fennis (2010) Design of ecological concrete by particle packing optimization.
- Fennis, S. A. A. M., Walraven, J. C. et Den Uijl, J. A. (2013) Compaction-interaction packing mode. Regarding the effect of fillers in concrete mixture design. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*.
- Figueiras, H., Nunes, S., Coutinho, J. S. et Figueiras, J. (2009) Combined effect of two sustainable technologies: Self-compacting concrete (SCC) and controlled permeability formwork (CPF). *Construction and Building Materials*.
- Flatt, R. J., Roussel, N. et Cheeseman, C. R. (2012) Concrete: An eco material that needs to be improved. *Journal of the European Ceramic Society*.
- Frazao, E. B. et Sbrighi, N. C. (1980) The influence of the shape of the coarse aggregate on some hydraulic concrete properties. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology - Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur*.
- Fuller, W. B. et Thomson, S. E. (1907) The Laws of Proportioning Concrete. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*.
- Funk, J. E. et Dinger, D. (1994) Predictive Process Control of Crowded Particulate Suspensions: Applied to Ceramic Manufacture. *Livros. Kluwer Academic Publishers*.

- Furnas, C. C. (1930) Flow of gases through beds of broken solids. Journal of the Franklin Institute.
- Garas, V. Y. et Kurtis, K. E. (2008) Assessment of methods for optimising ternary blended concrete containing metakaolin. Magazine of Concrete Research.
- Garboczi, E. J., Martys, N. S., Saleh, H. H. et Livingston, R. A. (2001) Acquiring, Analyzing, and Using Complete Three Dimensional Aggregate Shape Information. Proceedings of the 9th Annual ICAR Symposium, vol. Austin, TX, p. 13.
- Geiker, M. R., Brandl, M., Thrane, L. N. et Nielsen, L. F. (2002) On the effect of coarse aggregate fraction and shape on the rheological properties of self-compacting concrete. Cement, Concrete and Aggregates.
- Glavind, M. and Munch-Petersen, C. (2002) Green Concrete - a life cycle approach. Challenges of Concrete Construction. Thèse de doctorat, University of Dundee.
- Glavind, M. et Pedersen, E. J. (1999) Packing Calculations Applied for Concrete Mix Design. Proceedings Creating with Concrete.
- Grünewald, S. et Schutter, G. De (2016) Design Considerations and Sustainability of Self-Compacting Concrete. In K.H. Khayat (dir.), Proceedings of 8th International RILEM symposium on self-compacting concrete – SCC, vol. 1041-1050. Washington DC, United States.
- Gursel, A. P., Maryman, H. et Ostertag, C. (2016) A life-cycle approach to environmental, mechanical, and durability properties of « green » concrete mixes with rice husk ash. Journal of Cleaner Production.
- Habert, G., D'Espinose De Lacaillerie, J. B. et Roussel, N. (2011) An environmental evaluation of geopolymer based concrete production: Reviewing current research trends. Journal of Cleaner Production.
- Habert, G. et Roussel, N. (2009) Study of two concrete mix-design strategies to reach carbon mitigation objectives. Cement and Concrete Composites.
- Hafid, H., Ovarlez, G., Toussaint, F., Jezequel, P. H. et Roussel, N. (2016) Effect of particle morphological parameters on sand grains packing properties and rheology of model mortars. Cement and Concrete Research.
- Hong, L., Gu, X. et Lin, F. (2014) Influence of aggregate surface roughness on mechanical properties of interface and concrete. Construction and Building Materials.
- Hosseinpour, M., Khayat, K. H. et Yahia, A. (2017) Numerical simulation of self-consolidating concrete flow as a heterogeneous material in L-Box set-up: Effect of rheological parameters on flow performance. Cement and Concrete Composites.
- Hunger, M. (2010) An integral design concept for ecological self-compacting concrete. Bouwstenen 146.
- Hunger, M. et Brouwers, H. J. H. (2009) Flow analysis of water-powder mixtures:

Application to specific surface area and shape factor. *Cement and Concrete Composites*.

- Hüsken, G. et Brouwers, H. J. H. (2008) A new mix design concept for earth-moist concrete: A theoretical and experimental study. *Cement and Concrete Research*.
- Joshi, R. C. et Lohtia, R. P. (1998) Fly ash in concrete: Production, properties and uses. *Fuel and Energy Abstracts*.
- Kadri, E. H., Aggoun, S., De Schutter, G. et Ezziane, K. (2010) Combined effect of chemical nature and fineness of mineral powders on Portland cement hydration. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*.
- Kamal, M., Ammâr, K. D., Rapporteur, Y., Gallias, J.-L., Hwang, S.-D., Baudouin, E. et Aïssoun, M. (2011) ÉTUDE DE L'INFLUENCE DES CARACTÉRISTIQUES DES GRANULATS SUR LA PERFORMANCE DES BÉTONS FLUIDES À RHÉOLOGIE ADAPTÉE. Thèse de doctorat, Université de Sherbrooke.
- Kaufmann, J., Winnefeld, F. et Hesselbarth, D. (2004) Effect of the addition of ultrafine cement and short fiber reinforcement on shrinkage, rheological and mechanical properties of Portland cement pastes. *Cement and Concrete Composites*.
- Khayat, K. H. (1998) Use of viscosity-modifying admixture to reduce top-bar effect of anchored bars cast with fluid concrete. *ACI Materials Journal*.
- Khayat, K. H. (1999) Workability, testing, and performance of self-consolidating concrete. *ACI Materials Journal*.
- Koehler, E. P. (2007) Aggregates in Self-Consolidating Concrete. Thèse de doctorat, The University of Texas at Austin.
- Krieger, I. M. et Dougherty, T. J. (1959) A Mechanism for Non-Newtonian Flow in Suspensions of Rigid Spheres. *Transactions of the Society of Rheology*.
- Kronlöff, A. (1997) Filler effect of inert mineral powder in concrete. *VTT Publications*.
- Kumar, S. V. et Santhanam, M. (2003) Particle packing theories and their application in concrete mixture proportioning: A review. *Indian Concrete Journal*.
- Lagerblad, B. et Vogt, C. (2004) Ultrafine particles to save cement and improve concrete properties. *CBI Rapporteur*.
- Leclerc, A. (2011) Élaboration des protocoles d'essais, de consolidation et de formulation des bétons semi-autoplaçants pour le bâtiment. Thèse de doctorat, Université de Sherbrooke.
- Long, G., Gao, Y. et Xie, Y. (2015) Designing more sustainable and greener self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*.
- Long, W. J., Gu, Y., Liao, J. et Xing, F. (2017) Sustainable design and ecological evaluation of low binder self-compacting concrete. *Journal of Cleaner Production*.

- Long, W. J., Khayat, K. H., Lemieux, G., Hwang, S. D. et Han, N. X. (2014) Performance-based specifications of workability characteristics of prestressed, precast self-consolidating concrete-A North American prospective. *Materials*.
- Matos, P. R. de, Foiato, M. et Prudêncio, L. R. (2019) Ecological, fresh state and long-term mechanical properties of high-volume fly ash high-performance self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*.
- Mehdipour, I. et Khayat, K. H. (2018) Understanding the role of particle packing characteristics in rheo-physical properties of cementitious suspensions: A literature review. *Construction and Building Materials*.
- Mehta, K. (2001) Reducing the environmental impact of concrete. *Concrete international*.
- Mohammed, M. K., Dawson, A. R. et Thom, N. H. (2013) Production, microstructure and hydration of sustainable self-compacting concrete with different types of filler. *Construction and Building Materials*.
- Molugaram, K., Shanker, J. S. et Ramesh, A. (2014) A study on influence of shape of aggregate on strength and quality of concrete for buildings and pavements. *Advanced Materials Research*.
- Moosberg-Bustnes, H., Lagerblad, B. et Forssberg, E. (2004) The function of fillers in concrete. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*.
- Mueller, F. V. (2012) Design criteria for low binder Self-Compacting Concrete , Eco-SCC, Ph.D. Thesis, p. 343.
- Mueller, F. V., Wallevik, O. H. et Khayat, K. H. (2014) Linking solid particle packing of Eco-SCC to material performance. *Cement and Concrete Composites*.
- Okamura, H. (1988) Self-Compacting High-Performance Concrete. *Concrete International*.
- ONU Changements climatiques Infos (2018) L'Association mondiale du ciment appelle le secteur à agir d'urgence en faveur du climat.
- Ostrowski, K., Sadowski, Ł., Stefaniuk, D., Wałach, D., Gawenda, T., Oleksik, K. et Usydus, I. (2018) The effect of the morphology of coarse aggregate on the properties of self-compacting high-performance fibre-reinforced concrete. *Materials*.
- Ouchi, M. (2001) Self-compacting concrete -development, applications and key technologies. *Proceedings of the Fourth International Conference on Materials Engineering for Resources*.
- Ouchi, M., Aki, S., Osterberg, T., Hallberg, S.-E. et Lwin, M. (2003) Applications of Self-Compacting Concrete in Japan, Europe and the United States. *Federal Highway Administration*.
- Ouro Koura, B. I., Hosseinpour, M., Yahia, A., Kadri, E. H. et Kaci, A. (2020) A new proportioning approach of low and normal binder self-consolidating concrete based on the characteristics of fine mortar and granular skeleton. *Construction and Building*

Materials.

- Ozawa, K., Maekawa, K., Kunishima, M. et Okamura, H. (1989) Development of high performance concrete based on the durability design of concrete structures. Proceeding of the Second East - Asia and Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC - 2).
- ÖZEN, M. (2007) PhD Thesis - Investigation of relationship between aggregate shape parameters and concrete strength using imaging techniques. 硕士学位论文.
- Pelisser, F., Vieira, A. et Bernardin, A. M. (2018) Efficient self-compacting concrete with low cement consumption. *Journal of Cleaner Production*.
- Peronius, N. et Sweeting, T. J. (1985) On the correlation of minimum porosity with particle size distribution. *Powder Technology*.
- Petek Gursel, A., Masanet, E., Horvath, A. et Stadel, A. (2014) Life-cycle inventory analysis of concrete production: A critical review. *Cement and Concrete Composites*.
- Pierre-Claude, A. (2007) Binders for durable and sustainable concrete. *Binders for Durable and Sustainable Concrete*.
- Polat, R., Yadollahi, M. M., Sagsoz, A. E. et Arasan, S. (2013) The Correlation between Aggregate Shape and Compressive Strength of Concrete. *International Journal of Structural and Civil Engineering Research*.
- Poppe, A. M. et De Schutter, G. (2005) Cement hydration in the presence of high filler contents. *Cement and Concrete Research*.
- Powers, T. C. (1968) *Properties of Fresh Concrete*. New York : John Wiley & Sons.
- Proske, T., Hainer, S., Rezvani, M. et Graubner, C. A. (2013) Eco-friendly concretes with reduced water and cement contents - Mix design principles and laboratory tests. *Cement and Concrete Research*.
- Proske, T., Hainer, S., Rezvani, M. et Graubner, C. A. (2016) Eco-Friendly Concretes With Reduced Water and Cement Content: Mix Design Principles and Experimental Tests. *Handbook of Low Carbon Concrete*.
- Quiroga, P. N. (2003) The Effect of Aggregate Characteristics on the Performance of Portland Cement Concrete. Thèse de doctorat, The University of Texas.
- Rocco, C. G. et Elices, M. (2009) Effect of aggregate shape on the mechanical properties of a simple concrete. *Engineering Fracture Mechanics*.
- Rosković, R. et Bjegović, D. (2005) Role of mineral additions in reducing CO<sub>2</sub> emission. *Cement and Concrete Research*.
- Roussel, N. (2006) A theoretical frame to study stability of fresh concrete. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*.
- Roussel, N., Lemaître, A., Flatt, R. J. et Coussot, P. (2010) Steady state flow of cement

- suspensions: A micromechanical state of the art. *Cement and Concrete Research*.
- Shilstone, J. M. (1990) Concrete Mixture Optimization. *Concrete International*, vol. 12, n°6, p. 33-39.
- Shilstone, J. M. et Shilstone, J. M. (2002) Performance-Based Concrete Mixtures and Specifications for Today. *Concrete International*, n°2, p. 80-83.
- Sokhansefat, G., Ley, M. T., Cook, M. D., Alturki, R. et Moradian, M. (2019) Investigation of concrete workability through characterization of aggregate gradation in hardened concrete using X-ray computed tomography. *Cement and Concrete Composites*.
- Sotomayor Cruz, C. D. (2012) Development of semi self-consolidating concrete with adapted rheology for infrastructure, (in French), M.Sc. Thesis.
- Stovall, T., de Larrard, F. et Buil, M. (1986) Linear packing density model of grain mixtures. *Powder Technology*.
- Talbot, A. N. et Richart, F. E. (1923) The strength of concrete its relation to the cement aggerates and water. *University of Illinois Bulletin*.
- Tanaka, K., Sato, K., Watanabe, S., Arima, I. et Suenaga, K. (1993) Development and Utilization of High-Performance Concrete for the Construction of the Akashi Kaikyo Bridge. *ACI Special Publication 140*.
- The European Project Group (2005) The European Guidelines for Self-Compacting Concrete. *The European Guidelines for Self Compacting Concrete*.
- Tierrie, J., Baaj, H. et Darmedru, P. (2016) Modeling the relationship between the shape and flowing characteristics of processed sands. *Construction and Building Materials*.
- Turner, L. K. et Collins, F. G. (2013) Carbon dioxide equivalent (CO<sub>2</sub>-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete. *Construction and Building Materials*.
- Vogt, C. (2010) Ultrafine particles in concrete - Influence of ultrafine particles on concrete properties and application to concrete mix design. *School of Architecture and the Built Environment Division of Concrete Structures*.
- Wagner, T. et Lipinski, H.-G. (2013) IJBlob: An ImageJ Library for Connected Component Analysis and Shape Analysis. *Journal of Open Research Software*.
- Wallevik, O. H., Mansour, W. I., Yazbeck, F. H. et Kristjansson, T. I. (2014) EcoCrete-Xtreme: Extreme performance of a sustainable concrete. *Proceedings of the International Symposium on Eco-Crete*, n°October, p. 3-10.
- Wallevik, O. H., Mueller, F. V, Hjartarson, B. et Kubens, S. (2009) The green alternative of self-compacting concrete, Eco-SCC. *XVII IBAUSIL Weimar*, Vol. 1.
- Wallevik, O. H. et Wallevik, J. E. (2011) Rheology as a tool in concrete science: The use of rheographs and workability boxes. *Cement and Concrete Research*.



- 
- Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E. et Weidema, B. (2016) The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *International Journal of Life Cycle Assessment*.
- Westerholm, M., Lagerblad, B., Silfwerbrand, J. et Forssberg, E. (2008) Influence of fine aggregate characteristics on the rheological properties of mortars. *Cement and Concrete Composites*.
- Wong, H. H. C. et Kwan, A. K. H. (2008) Packing density of cementitious materials: measurement and modelling. *Magazine of Concrete Research*.
- Worrell, E., Price, L., Martin, N., Hendriks, C. et Meida, L. O. (2001) Carbon dioxide emissions from the global cement industry. *Annual Review of Energy and the Environment*.
- Xiao, Y., Wang, F., Cui, P., Lei, L., Lin, J. et Yi, M. (2018) Evaluation of fine aggregate morphology by image method and its effect on skid-resistance of micro-surfacing. *Materials*.
- Yang, K. H., Song, J. K. et Song, K. I. (2016) CO<sub>2</sub> Reduction Assessment of Alkali-Activated Concrete Based on Korean Life-Cycle Inventory Database. *Handbook of Low Carbon Concrete*.
- Zhao, H., Sun, W., Wu, X. et Gao, B. (2015) The properties of the self-compacting concrete with fly ash and ground granulated blast furnace slag mineral admixtures. *Journal of Cleaner Production*.
- Zheng, J., Johnson, P. F. et Reed, J. S. (1990) Improved Equation of the Continuous Particle Size Distribution for Dense Packing. *Journal of the American Ceramic Society*.
- Zheng, J., Zhou, X. et Fu, C. (2014) Experiment and modeling of the effect of aggregate shape on the chloride diffusivity of concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*.
- Zuo, W., Liu, J., Tian, Q., Xu, W., She, W., Feng, P. et Miao, C. (2018) Optimum design of low-binder Self-Compacting Concrete based on particle packing theories. *Construction and Building Materials*.